

**ZnO ESASLI NANOYAPILI YARIİLETKEN İNCE
FİLMLEİN BÜYÜTÜLMESİ VE GAZ SENSÖRLERİNİN
ÜRETİLMESİ**

Handan AYDIN

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU

ŞUBAT-2013

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZnO ESASLI NANOYAPILI YARIİLETKEN İNCE FİMLERİN BÜYÜTÜLMESİ VE
GAZ SENSÖRLERİNİN ÜRETİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Handan AYDIN
(07114203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.01.2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 15.02.2013

Tez Danışmanı :
Diğer Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU (F.Ü)

Prof. Dr. Yusuf ATICI (F.Ü)

Prof. Dr. Memet ŞEKERCİ (F.Ü)

Prof. Dr. Raşit ZENGİN (F.Ü)

Doç. Dr. M. Enver AYDIN (D.Ü)

ŞUBAT-2013

ÖNSÖZ

Doktora tezimin hazırlanmasında benden maddi ve manevi yardımlarını asla esirgemeyen, desteğinden hep onur duyduğum, bilgi ve tecrübesi ile çalışmalarına yol gösteren, karşılaştığım tüm zorlukların çözümlenmesinde her zaman yardımcı olan çok değerli hocam, genç bilim insanı Sn. Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU 'na,

Deneysel çalışmalarım sürece yardımlarını esirgemeyen Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Sn Doç.Dr. Müjdat ÇAĞLAR'a,

Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünün değerli Öğretim Üyelerine,

Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Elektronik Malzeme ve Nano Teknoloji Araştırma Laboratuvarındaki Tüm çalışma arkadaşlarıma,

Tez çalışmalarına sunduğu imkânlar ve FÜBAP–2017 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan başta Fırat Üniversitesi olmak üzere Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne,

Eğitim hayatım boyunca hep yanımda olan, dualarını ve desteklerini benden hiç esirgemeyen sevgili aileme,

Tez çalışmam sırasında her konuda bana gönülden yardım eden, destek veren, hoşgörüsü, sevgisi ve desteğiyle hep yanımda olan sevgili eşim, hayat arkadaşım Cihat AYDIN'a,

ve

Varlığıyla bana güç veren Oğlum, Kenan Tuğberk AYDIN'a,

Eğer yeterse, gönülden teşekkür eder, şükranlarımı sunarım....

Handan AYDIN

ELAZIĞ – 2013

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	XV
SEMBOLLER LİSTESİ	XVII
1. GİRİŞ	1
1.1. Çinko Oksit (ZnO)	4
1.2. İnce Filmlerin Büyütülmesi	8
1.3. Film Kaplama Teknikleri	11
1.3.1. Sol-jel Metodu	12
1.3.2. Sol-jel Yönteminin Avantajları.....	14
1.3.3. Sol-jel Yöntemin Dezavantajları.....	15
1.3.4. Sol-jel ile İnce Film Kaplama Metotları.....	17
1.3.4.1. Döndürme ile Kaplama Metodu.....	18
1.4. Optik Özellikler	21
1.4.1. Temel Absorpsiyon Olayı.....	23
1.4.1.1. Doğrudan Band Geçişleri	25
1.4.1.2. Dolaylı Band Geçişleri	27
1.5. Nanoteknoloji.....	29
1.5.1. Gelecekte Nanoteknoloji	30
1.5.2. Nanoteknolojinin Avantajları	31
1.6. Gaz Sensörleri.....	32
1.6.1. Gaz Sensör Ünitesi.....	36
1.6.1.1. Elektronik Değerlendirme ve Uyarı Sinyali Gönderme Birimi.....	36
1.6.1.2. Sesli Işıklı Uyarı Sistemi	36
1.6.1.3. Otomatik Gaz Kesme Vanası.....	36
1.6.2. Sensörlerin Sınıflandırılması	37

1.6.2.1.	Yarı İletken Esaslı Sensörler	39
1.6.3.	Gaz Sensör Çalışmalarında Aralıklı Elektroda Sahip Sensörlerin Kullanılması.....	40
1.6.4.	Gaz Sensörleri Uygulama Alanları	43
1.6.5.	Algılayıcı Malzeme-Gaz Etkileşimleri.....	44
1.6.6.	Bir Gaz Sensörde Bulunması Gereken Özellikler	45
1.6.6.1.	Seçicilik	45
1.6.6.2.	Tekrarlanabilirlik	46
1.6.6.3.	Kararlılık.....	46
1.6.6.4.	Kalibrasyon Gereksinimi.....	46
1.6.6.5.	Geniş Ölçüm Aralığı	46
1.6.6.6.	Hızlı Cevap Zamanı	47
1.6.6.7.	Hızlı Geriye Dönme Zamanı	47
1.6.6.8.	Kullanım Ömrü	47
1.6.6.9.	Basit ve Ucuzluk	48
1.6.6.10.	Minyatürizasyon ve Sterilize Edilebilirlik.....	48
1.6.6.11.	Yüksek Duyarlılık	48
1.6.6.12.	Tayin Sınırı	48
2.	MATERYAL VE METOT.....	49
2.1.	İnce Filmlerin Büyütülmesi	50
2.2.	X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri	52
2.3.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları.....	69
2.4.	Numunelerin AFM Yüzey Görüntüleri	93
2.5.	Optik Özellikler	117
2.6.	Gaz Sensörlerin Hazırlanması ve Elektriksel Ölçümleri.....	132
3.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	147
4.	ÖNERİLER.....	150
	KAYNAKLAR	151
	ÖZGEÇMİŞ	159

ÖZET

Bu doktora tez çalışmasında, katkısız ve Al, Cu ve Sn ile % 0,1at., %0,5at., %1at., %2at., %5at. atomik oranlarda katkılandırılmış ZnO filmleri sol-jel metodu ile hazırlandı. Filmler döndürme kaplama metodu kullanılarak büyütüldü. Filmlerin kristal yapısı ve yüzey morfolojisi, X ışınları kırınım tekniği (XRD), taramalı elektron mikroskop (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yardımıyla araştırıldı. XRD sonuçları katkısız ve katkılandırılmış ZnO filmlerin hegzagonal polikristal yapıda olduğunu göstermiştir.

Filmlerin kristal boyutu ve örgü sabitleri hesaplandı. Kristal yapı sonuçları filmlerin nanomalzeme olduğu gösterir. AFM sonuçları filmlerin nano tanelere sahip fiberlerden oluştuğunu göstermiştir. Filmlerin optik band aralıkları optik absorpsiyon metodu ile belirlendi ve 3.024eV-3.297eV aralığında bulundu. Amonyak gaz sensörleri katkısız ve metal katkılandırılmış ZnO filmler kullanılarak hazırlandı. Gaz sensörlerinin duyarlılık özellikleri Al, Cu ve Sn katkıları kullanılarak geliştirildi. Elde edilen gaz ölçüm sonuçları hazırlanan gaz sensörlerinin amonyak gazının belirlenmesinde kullanılabileceğini gösterir.

Anahtar Kelimeler: Gaz Sensörleri, ZnO, Yarıiletken Gaz Sensörleri

ABSTRACT

GROWN OF ZNO BASED ON NANOSTRUCTURE SEMICONDUCTOR THIN FILMS AND FABRICATION OF GAS SENSORS

In present PhD. thesis study, the films of undoped and ZnO doped with Al, Cu and Sn dopants for various atomic ratios of 0.1%at., 0.5%at., 1%at., 2%at., 5%at. were prepared by the sol gel method. The films were grown by spin coating method. The crystal structures and surface morphologies of the films were investigated by X-ray diffraction technique, scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy. The XRD results indicate that undoped and doped ZnO films are polycrystalline with a hexagonal structure.

The crystallite size and lattice constants of the films were calculated. The obtained crystallite size results suggest that the films are nanomaterials. The AFM results indicate that the films are formed from fibers having the nanoparticles. The optical band gaps of the films were determined by optical absorption method and the optical band gaps of the films were found in the range of 3.024 and 3.297 eV. The ammonium gas sensors were prepared using undoped and metal doped ZnO films. The sensitivity properties of the gas sensors were improved using Al, Cu and Sn dopants. The obtained gas sensor results suggest that the prepared gas sensors can be used for detection of ammonium gas.

Key words: Gas sensors, Zinc oxide, Metal oxide Semiconductor

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	ZnO'nin kristal yapısı.	5
Şekil 1.2.	ZnO kristal yapıların gösterimi: (a) kübik kayatuzu (B1), (b) kübik çinko sülfür (B3), (c) hegzagonal wurtzit (B4).	8
Şekil 1.3.	Taban yüzeyinde yapışma yerleri.	9
Şekil 1.4.	Film büyümesi.	9
Şekil 1.5.	Sol-jel yönteminin şematik olarak gösterimi.	13
Şekil 1.6.	Solüsyonun döndürme ile kaplamada numune yüzeyine damlatılması.	18
Şekil 1.7.	Döndürme ile kaplamada çözeltinin düşük hızlarda döndürülmesi.	19
Şekil 1.8.	Döndürme ile kaplamada çözeltinin yüksek hızlarda döndürülmesi.	19
Şekil 1.9.	Döndürme ile kaplamada çözeltinin düşük hızlarda döndürülerek jelleşmenin sağlanması.	20
Şekil 1.10.	Yarıiletkenlerde gelen ışık- dalga boyu absorpsiyon grafiği.	24
Şekil 1.11.	Bir yarıiletkende doğrudan band geçişinin şematik gösterimi.	27
Şekil 1.12.	Bir yarıiletkende dolaylı band geçişinin şematik gösterimi.	29
Şekil 1.13.	Boyut aralığının şematik gösterimi.	29
Şekil 1.14.	Çalışma prensiplerine göre sensörlerin sınıflandırılması.	37
Şekil 1.15.	Çeşitli aralıklı elektroda sahip sensörlerin yapısı.	41
Şekil 1.16.	Deney numunesinin şematik gösterimi.	42
Şekil 1.17.	Sensörlerin ölçüm aralığı.	47
Şekil 2.1.	Deney akım şeması.	49
Şekil 2.2.	İnce filmlerin büyütüldüğü döndürme ile kaplama cihazı.	50
Şekil 2.3.	Film oluşturma.	51
Şekil 2.4.	X-ışını kırınım spektrumlarının elde edildiği XRD cihazı.	54
Şekil 2.5.	Tüm Al katkılı ZnO numunelerinin 3 boyutlu X-ışını kırınım desenleri.	55
Şekil 2.6.	Tüm Cu katkılı ZnO numunelerinin 3 boyutlu X-ışını kırınım desenleri.	60
Şekil 2.7.	Tüm Sn katkılı ZnO numunelerinin 3 boyutlu X-ışını kırınım desenleri.	65
Şekil 2.8.	Katkısız ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.	71

Şekil 2.9.	% 0,1at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	72
Şekil 2.10.	% 0,5at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 1 µm b) 200 nm.....	73
Şekil 2.11.	% 1at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	74
Şekil 2.12.	% 2at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	75
Şekil 2.13.	% 5at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	76
Şekil 2.14.	Katkısız ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm	78
Şekil 2.15.	% 0,1at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	79
Şekil 2.16.	% 0,5at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	80
Şekil 2.17.	% 1at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	81
Şekil 2.18.	% 2at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	82
Şekil 2.19.	% 5at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	83
Şekil 2.20.	Katkısız ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm	85
Şekil 2.21.	% 0,1at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 1 µm b) 200 nm	86
Şekil 2.22.	% 0,5at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm.....	87
Şekil 2.23.	% 1at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm	88
Şekil 2.24.	% 2at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm	89
Şekil 2.25.	% 5at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm	90
Şekil 2.26.	Tane büyüklüğünün Al katkısına göre değişimi.....	91
Şekil 2.27.	Tane büyüklüğünün Cu katkısına göre değişimi.....	92
Şekil 2.28.	Tane büyüklüğünün Sn katkısına göre değişimi	93
Şekil 2.29.	Yüzey Morfolojisini incelemeye kullanılan atomik kuvvet mikroskobu (AFM)	94
Şekil 2.30.	Katkısız ZnO numunesinin 40µx40µ 2 boyutlu AFM görüntüsü	95
Şekil 2.31.	Katkısız ZnO numunesinin 5µx5µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	95
Şekil 2.32.	Katkısız ZnO numunesinin 1µx1µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	95
Şekil 2.33.	Katkısız ZnO numunesinin 40µx40µ 3boyutlu AFM görüntüsü	95
Şekil 2.34.	Katkısız ZnO numunesinin 5µx5µ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	95
Şekil 2.35.	Katkısız ZnO numunesinin 1µx1µ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	95
Şekil 2.36.	% 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin 40µx40µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	96
Şekil 2.37.	% 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin 5µx5µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	96

Şekil 2.38.	% 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu \times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	96
Şekil 2.39.	% 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu \times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	96
Şekil 2.40.	% 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu \times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	96
Şekil 2.41.	% 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu \times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	96
Şekil 2.42.	% 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu \times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	97
Şekil 2.43.	% 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu \times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	97
Şekil 2.44.	% 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu \times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	97
Şekil 2.45.	% 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu \times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	97
Şekil 2.46.	% 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu \times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	97
Şekil 2.47.	% 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu \times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	97
Şekil 2.48.	% 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu \times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	98
Şekil 2.49.	% 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu \times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	98
Şekil 2.50.	% 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu \times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	98
Şekil 2.51.	% 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu \times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	98
Şekil 2.52.	% 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu \times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	98
Şekil 2.53.	% 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu \times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	98

Şekil 2.54.	% 2at. Al katkılı ZnO numunesinin 40µx40µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	99
Şekil 2.55.	% 2at. Al katkılı ZnO numunesinin 5µx5µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	99
Şekil 2.56.	% 2at. Al katkılı ZnO numunesinin 1µx1µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	99
Şekil 2.57.	% 2at. Al katkılı ZnO numunesinin 40µx40µ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	99
Şekil 2.58.	% 2at. Al katkılı ZnO numunesinin 5µx5µ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	99
Şekil 2.59.	% 2at. Al katkılı ZnO numunesinin 1µx1µ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	99
Şekil 2.60.	% 5at. Al katkılı ZnO numunesinin 40µx40µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	100
Şekil 2.61.	% 5at. Al katkılı ZnO numunesinin 5µx5µ 2 boyutlu AFM görüntüsü...	100
Şekil 2.62.	% 5at. Al katkılı ZnO numunesinin 1µx1µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	100
Şekil 2.63.	% 5at. Al katkılı ZnO numunesinin 40µx40µ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	100
Şekil 2.64.	% 5at. Al katkılı ZnO numunesinin 5µx5µ 3 boyutlu AFM görüntüsü...	100
Şekil 2.65.	% 5at. Al katkılı ZnO numunesinin 1µx1µ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	100
Şekil 2.66.	Katkısız ZnO numunesinin 40µx40µ 2 boyutlu AFM görüntüsü	102
Şekil 2.67.	Katkısız ZnO numunesinin 5µx5µ 2 boyutlu AFM görüntüsü	102
Şekil 2.68.	Katkısız ZnO numunesinin 1µx1µ 2 boyutlu AFM görüntüsü	102
Şekil 2.69.	Katkısız ZnO numunesinin 40µx40µ 3 boyutlu AFM görüntüsü	102
Şekil 2.70.	Katkısız ZnO numunesinin 5µx5µ 3 boyutlu AFM görüntüsü	102
Şekil 2.71.	Katkısız ZnO numunesinin 1µx1µ 3 boyutlu AFM görüntüsü	102
Şekil 2.72.	%0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin 40µx40µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	103
Şekil 2.73.	%0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin 5µx5µ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	103

Şekil 2.74.	%0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	103
Şekil 2.75.	%0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	103
Şekil 2.76.	%0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	103
Şekil 2.77.	%0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	103
Şekil 2.78.	%0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	104
Şekil 2.79.	%0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	104
Şekil 2.80.	%0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	104
Şekil 2.81.	%0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	104
Şekil 2.82.	%0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	104
Şekil 2.83.	%0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	104
Şekil 2.84.	% 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	105
Şekil 2.85.	% 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	105
Şekil 2.86.	% 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	105
Şekil 2.87.	% 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	105
Şekil 2.88.	% 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	105
Şekil 2.89.	% 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	105

Şekil 2.90.	% 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	106
Şekil 2.91.	% 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	106
Şekil 2.92.	% 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	106
Şekil 2.93.	% 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	106
Şekil 2.94.	% 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	106
Şekil 2.95.	% 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	106
Şekil 2.96.	% 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	107
Şekil 2.97.	% 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	107
Şekil 2.98.	% 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	107
Şekil 2.99.	% 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	107
Şekil 2.100.	% 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	107
Şekil 2.101.	% 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	107
Şekil 2.102.	Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü	109
Şekil 2.103.	Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	109
Şekil 2.104.	Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	109
Şekil 2.105.	Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü	109
Şekil 2.106.	Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	109
Şekil 2.107.	Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	109
Şekil 2.108.	%0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	110

Şekil 2.109.	%0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	110
Şekil 2.110.	%0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	110
Şekil 2.111.	%0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	110
Şekil 2.112.	%0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	110
Şekil 2.113.	%0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	110
Şekil 2.114.	%0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	111
Şekil 2.115.	%0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	111
Şekil 2.116.	%0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	111
Şekil 2.117.	%0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	111
Şekil 2.118.	%0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	111
Şekil 2.119.	%0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	111
Şekil 2.120.	% 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	112
Şekil 2.121.	% 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	112
Şekil 2.122.	% 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	112
Şekil 2.123.	% 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	112
Şekil 2.124.	% 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	112

Şekil 2.125. % 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	112
Şekil 2.126. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	113
Şekil 2.127. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	113
Şekil 2.128. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	113
Şekil 2.129. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	113
Şekil 2.130. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	113
Şekil 2.131. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	113
Şekil 2.132. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	114
Şekil 2.133. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	114
Şekil 2.134. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü.....	114
Şekil 2.135. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\times 40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	114
Şekil 2.136. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\times 5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü.....	114
Şekil 2.137. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\times 1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü ...	114
Şekil 2.138. Bir yarıiletkende absorpsiyon katsayısının fotonun enerjisine göre değişiminden, yasak enerji aralığının belirlenmesi [3].....	118
Şekil 2.139. Işığın materyale dik gelmesi durumunda soğurulma, geçirilme ve yansıma süreci [14].....	120
Şekil 2.140. Optik ölçümler için kullanılan spektrofotometre.....	122
Şekil 2.141. Katkısız ve Al katkılı ZnO ince filmlerin absorban spektrumları.....	123
Şekil 2.142. Katkısız ve Cu katkılı ZnO ince filmlerin absorban spektrumları.....	124

Şekil 2.143.	Katkısız ve Sn katkılı ZnO ince filmlerin absorbanans spektrumları	124
Şekil 2.144.	Katkısız ve Al katkılı ZnO numunelerin geçirgenlik spektrumları.....	125
Şekil 2.145.	Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunelerin geçirgenlik spektrumları	126
Şekil 2.146.	Katkısız ve Sn katkılı ZnO numunelerin geçirgenlik spektrumları.....	126
Şekil 2.147.	Katkısız ve Al katkılı ZnO numunelerin yansıma spektrumları	127
Şekil 2.148.	Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunelerin yansıma spektrumları.....	128
Şekil 2.149.	Katkısız ve Sn katkılı ZnO numunelerin yansıma spektrumları	128
Şekil 2.150.	Katkısız ve Al katkılı ZnO numunelerin $(\alpha hv)^2 - hv$ grafikleri	129
Şekil 2.151.	Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunelerin $(\alpha hv)^2 - hv$ grafikleri.....	130
Şekil 2.152.	Katkısız ve Sn katkılı ZnO numunelerin $(\alpha hv)^2 - hv$ grafikleri.....	130
Şekil 2.153.	Hazırlanan gaz sensörlerinin resmi.....	132
Şekil 2.154.	Vaksis PVD Handy Termal Buharlaştırma Sistemi	133
Şekil 2.155.	Gaz sensör deney düzeneği	136
Şekil 2.156.	Katkısız ve Al katkılı ZnO numunesinin akım-zaman grafiği	139
Şekil 2.157.	Al katkısı ile duyarlılık ve kristal boyutunun değişimi.....	140
Şekil 2.158.	Al katkısı ile duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi	140
Şekil 2.159.	Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunesinin akım-zaman grafiği.....	142
Şekil 2.160.	Cu katkısı ile duyarlılık ve kristal boyutunun değişimi	143
Şekil 2.161.	Cu katkısı ile duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi.....	143
Şekil 2.162.	Katkısız ZnO numunesinin akım - zaman grafiği	145
Şekil 2.163.	Sn katkısı ile duyarlılık ve kristal boyutunun değişimi	146
Şekil 2.164.	Sn katkısı ile duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi	146

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	ZnO'in temel fiziksel özellikleri	6
Tablo 1.2.	Sensör çeşitleri ve özellikleri.	39
Tablo 1.3.	Gaz sensörlerinin uygulama alanları	44
Tablo 2.1.	Katkısız ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri.....	55
Tablo 2.2.	% 0,1at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	56
Tablo 2.3.	% 0,5at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	57
Tablo 2.4.	% 1at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	57
Tablo 2.5.	% 2at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	58
Tablo 2.6.	% 5at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	59
Tablo 2.7.	Al katkılı ZnO numuneleri için kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri.....	59
Tablo 2.8.	Katkısız ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri.....	60
Tablo 2.9.	% 0,1at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	61
Tablo 2.10.	% 0,5at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	62
Tablo 2.11.	% 1at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	62
Tablo 2.12.	% 2at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	63
Tablo 2.13.	% 5at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri.....	64
Tablo 2.14.	Cu katkılı ZnO numuneleri için kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri.....	64
Tablo 2.15.	Katkısız ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri.....	65
Tablo 2.16.	% 0,1at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	66
Tablo 2.17.	% 0,5at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	67
Tablo 2.18.	% 1at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri	67
Tablo 2.19.	% 2at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri.....	68
Tablo 2.20.	% 5at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri.....	68
Tablo 2.21.	Sn katkılı ZnO numuneleri için kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri.....	69

Tablo 2.22.	Al katkılı ZnO numunelerin AFM’de ölçülen tanelerin ortalama değerleri	115
Tablo 2.23.	Cu katkılı ZnO numunelerin AFM’de ölçülen tanelerin ortalama değerleri	116
Tablo 2.24.	Sn katkılı ZnO numunelerin AFM’de ölçülen tanelerin ortalama değerleri	117
Tablo 2.25.	Al katkılı ZnO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri	131
Tablo 2.26.	Cu katkılı ZnO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri	131
Tablo 2.27.	Sn katkılı ZnO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri.....	131

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Absorbans
d	: Düzlemler arası mesafe
D	: Tane boyutu
E_c	: İletim bandı alt sınırı
E_d	: Donör enerji seviyesi
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_v	: Valans bandı üst sınırı
I₀	: Gözlenen şiddet
I_A	: Soğurulan ışığın şiddeti
I_R	: Yansıyan ışığın şiddeti
I_T	: Geçen ışığın şiddeti
N_a	: Akseptör yoğunluğu
N_d	: Donör yoğunluğu
R	: Yansıma katsayısı
T	: Geçirgenlik
α	: Lineer soğurma katsayısı
σ	: İletkenlik

1. GİRİŞ

Son yıllarda bilim adamlarının bilimsel araştırmalarda gösterdiği gayret sadece elektronik aygıtların boyutlarını küçöltmekle kalmamış teknolojinin adının ve yönünün değişmesine de neden olmuştur. Milyonlarca dolar bütçenin ayrıldığı, elektronik, kimya, fizik, malzeme bilimi, uzay ve sağlık bilimlerinin bir arada çalıştığı bu yeni bilime nanoteknoloji denilmektedir. Moleküler üretim olarak da adlandırılan nanoteknoloji, maddeyi nanometre seviyesinde işleyerek ve bu boyutlarda maddenin kazandığı değişik fiziksel, kimyasal, biyolojik özellikleri de kullanarak çalışan cihazlar ve sistemler elde etmeyi amaçlamaktadır [1]. Nanoteknoloji malzemeleri arasında; elmas filmler, organik filmler, yarıiletkenler, metal filmler, dielektrikler, ferroelektrik filmler ve piezoelektrik filmler bulunmaktadır [2].

Bunlar arasındaki yarıiletkenler günlük hayatımızda bilgisayarlardan cep telefonlarına kadar sıkça kullandığımız cihazların yapımında önemli bir yere sahiptir. Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar, yarıiletken güneş pilleri, termistörler, detektörler, sensörler gibi birçok cihaz yarıiletken maddelerden yapılır [3]. 1940'ların sonlarına doğru ortaya çıkan yarıiletken malzemeler elektronik endüstrisinde çok önemli değişikliklere neden olmuştur. Gerçekleşen minyatürleşme ile daha önceki devrelerin tek bir elemanından binlerce kat daha küçük bir pul üzerine şimdi komple sistemler yerleştirilebilmektedir. Yarıiletken sistemler daha küçük ve hafif olmaları, ısınmadan kaynaklanan kayıpların olmaması, daha sert yapıda olmaları, daha verimli olmaları ve ısınma sürelerine gerek duymamaları gibi özellikleri nedeniyle tercih edilirler [4].

Günümüzde güvenliğin daha da önem kazanması nedeniyle yanıcı, patlayıcı ve zehirleyici gazların algılanmasına yönelik araştırmalar artmaktadır. Bu doğrultuda sensörlerin önemi ortaya çıkmaktadır [2]. Sensörler çevredeki bir uyarıcıdan gelen ve insan duyu organları ile çok az veya hiç hissedilmeyen kimyasal ve fiziksel uyarıları hassas bir şekilde algılayıp ölçülebilen niceliklere çeviren elektronik devre elemanlarıdır [5,6]. Sensörler, dış ortamdaki fiziksel veya kimyasal değişimleri algılayabilen ve bu değişimleri elektrik sinyaline dönüştürebilen aygıtlardır. Gaz

ortamında çalışabilen ve bu ortamdaki gazın varlığını, cinsini veya yoğunluğunu algılayabilen sensörlere ise gaz sensörleri denir [5].

Gaz sensörleri atmosferik gazların algılama, ortaya çıkarma ve analiz edilmesini sağlar. Bu nedenle gaz sensörleri birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Örneğin maden ocaklarında toksik ve patlayıcı gazların ortaya çıkarılmasında, kalıntı gaz sızıntılarının önlenmesi ve atmosferik kirliliği kontrol etmek için kullanılır.

Endüstriyel alanda gaz sensörü ihtiyacının bu kadar yüksek olması ekonomik olarak büyük bir pazar oluşturmaktadır. Dolayısıyla günümüzde bu tür cihazların üretimi için nano boyutlu malzeme sentezi gereklidir. Bu nedenle günümüzde nanoteknolojiye yapılan yatırımlar gün geçtikçe artmaktadır [7].

Gaz sensörü uygulamalarında kullanılan ince ya da kalın film formunda kullanılan sensörler oldukça etkin çalışmaktadır. Bu sensörlerin küçük boyutlu olması, basit üretilmesi, düşük maliyetli olması, hafif olması ve düşük güç tüketimine sebep olması bu cihazların avantajlarıdır. Bu özellikleri elde etmek için birçok yarı iletken metaloksit (SnO_2 ve ZnO gibi), gaz sensörü üretiminde kullanılmaktadır [7].

Yapılan çalışmalarda kalınlığı $1\mu\text{m}$ 'den küçük filmler ince film (thin film) ve kalınlığı $1\mu\text{m}$ 'den büyük filmler kalın film (thick film) olarak adlandırılmıştır [3]. İnce filmler atomların ya da moleküllerin kaplanacakları yüzeye tek tek dizilmeleriyle hazırlanabilmektedir. Ayrıca ince filmler, hacimli malzemelerin yüzeyine kaplandığında onların tek başlarına sağlayamadıkları birçok özellikten dolayı optik, elektronik, manyetik, kimyasal ve mekanik alanlarını ilgilendiren endüstrilerde ileri teknoloji malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte çok katmanlı üretildiklerinde hacim özelliklerinden tamamen farklı bir şekilde, yeni malzemeler gibi davrandıklarından elektronik devre elemanları olarak kullanılabilirler [8].

ZnO ince film UV-VIS spektrumu, verimli bir soğurum kenarına sahip, iletken bir malzemedir ve iletkenliği tavlama ve katkılandırma ile kolaylıkla kontrol edilebilir. ZnO ince filmler düşük maliyetinden, zehirli olmamasından ve kolayca katkılandırılması gibi üstün özellikleri nedeniyle bu tez konusu için seçilmiştir.

Günümüzde sol-jel yöntemi çeşitli fonksiyonel oksit film türlerinin üretiminde ZnO ince filmlerinin kaplanmasında büyük ölçüde kullanılır. Sol-jel işlemi hidroliz ve yoğunlaştırma reaksiyon tabanlı bir işlemdir. Genel olarak sol-jel ile çözelti hazırlama işlemlerinde metal alkoksit kullanılır, fakat solün hazırlanmasında metal alkoksitlerin

reaksiyona girmesinden dolayı, sol hazırlama işlemi zor olabilir. alkoksitler birçok alkol içinde çözülmezler ve çok pahalıdırlar. Bu nedenle, birçok araştırmacı ince film hazırlanırken metal alkoksit yerine asetat gibi bazı metal tuzları, metal nitratları kullanmayı tercih eder. Çinko Asetat ucuz ve kolay elde edilir bir madde olduğu için deneysel çalışmalarda çoğunlukla tercih edilir [9].

Sol-jel yöntemi diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında; toz saflığı yüksektir ve başlangıç malzemeleri distilasyonla, kristallenmeyle ya da elektrolizle kolayca saflaştırılabilir. İşlem sıcaklığı oldukça düşüktür ve kimyasal reaksiyonların kinetiği kolayca kontrol edilir. Ayrıca birincil kolloidal tanelerin çekirdekleşme ve tane büyümesi kontrol edilerek istenilen şekil, tane ve tane boyut dağılımı elde edilebilir. Bu nedenlerden dolayı sol-jel yöntemi bu tez çalışması için uygun bir yöntem olarak seçilmiştir [10].

Bu doktora tez çalışmasının amacı; boyalarda, parfümlerde, temizlik malzemelerinde, patlayıcılarda, gübre yapımında, sanayide, nitrik asitin üretiminde, ürede ve plastiklerde çok miktarda kullanılan yoğun ve zararlı bir amonyak gazı ortamında çalışabilecek ve bu şartlarda tepki verebilecek ZnO esaslı ve katkısız, Al, Cu ve Sn katkılı nanoyapılı bir algılayıcı gaz sensörü üretmektir. Gaz duyarlılığının yanısıra cevap süresinin kısa ve geri dönüşümünün ise hızlı olması amaçlanmaktadır. Çünkü insan vücudunun amonyak gazına yüksek konsantrasyonlarda uzun süreli maruz kalması sakıncalıdır. Bu gaz solunursa üst solunum yollarında, göz, burun ve gırtlakta tahrişe sebep olur. Daha yüksek konsantrasyonda çok kısa sürede akciğerlerde ciddi hasarlara sebebiyet verebilir ve ölümcül olabilir, maruz kalımdan 48 saat sonra ciğerlerde ödem oluşturabilir ve ölüme sebebiyet verebilir. Meslek ve işi dolayısıyla sık sık ve fazla konsantrasyonlarda gaza maruz kalan insanların bu gibi tehlikelere maruz kalmaması ya da olası bir kaçak veya sızıntı durumunda hızlı bir şekilde uyarılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda üretilecek olan numuneler sol-jel yöntemi yardımıyla hazırlanacak ve bu hazırlanan film yüzeyine tasarlanan aralıklı elektroda sahip sensörler yardımıyla Al elektrotlar buharlaştırılıp sensör olarak kullanılacak numuneler oluşturulacaktır. Elde edilen ince filmlerin morfolojik özellikleri, optik özellikleri ve gaz sensörü özellikleri araştırılacaktır. Bulunan sonuçların ise literatürle uyumluluğu incelenerek gerekli yorumlar yapılacaktır. Bu çalışmalar sonucunda cevap süresi kısa,

ilk duruma dönme hızı yüksek olan üstün özellikli gaz sensörleri üretilmesi hedeflenmektedir.

1.1. Çinko Oksit (ZnO)

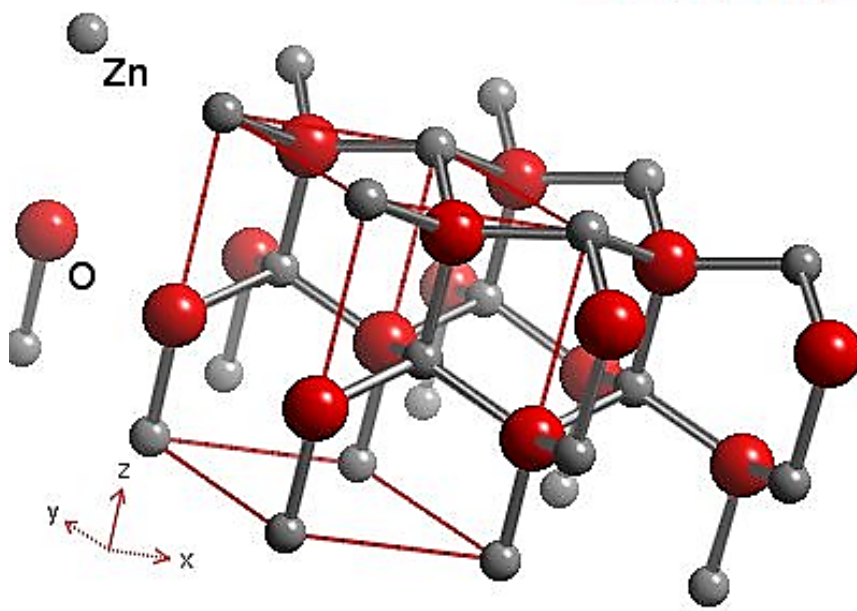
Çinko oksit önceleri sadece boya maddesi olarak kullanılmakta ve “beyaz çinko”, “çin beyazı” veya “çiçek beyazı” olarak adlandırılmaktaydı. Çinko oksit, bakırın eritilmesinden ortaya çıkan bir yan ürün olarak bilinmekteydi. Romalılar ise “cadmia” olarak adlandırmışlar ve pirinç elde etmekte, melhem yapımında kullanmışlardır. Bununla birlikte Roma’daki tüm kimyacılar cadmia’nın altına dönüştürülebileceğini düşünmüşlerdir.

18. yüzyılın ortalarında, Alman kimyacı Cramer, cadmia’nın metal çinkonun yanmasından (ısı ve ışık veren oksitlenme) elde edildiğini keşfetmiştir. Courtois Fransa’da 1781’de beyaz çinkoyu üretmeye başladı, fakat 1840’a kadar sanayide kullanılmadı, bu tarihten itibaren Reclaire tarafından sanayide kullanılmaya başlanmıştır. Sülfür gazından etkilenmemesi (siyahlaşmaması), toksik madde içermemesi ve iyi saklanabilmesi nedeniyle kurşun oksidin yerini almıştır. 1850’li yıllarda New Jersey deki S. Wethrill şirketi tarafından geliştirilen yöntem ile fırın içinde yüksek ısıda çinkoyu ısıtarak çinko koru haline getirdiler ve fırın dışına çıkarılan kor halindeki çinkonun havadaki oksijenle temasa geçmesiyle çinko oksit elde etmişlerdir. Bu yöntem geliştirilmiş fakat günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadır [10].

Çinko, mavimsi açık gri renkte, kırılğan bir metaldir. Periyodik tabloda geçiş elementleri grubunda yer alır. Düşük kaynama sıcaklığı dikkat çekicidir. Çinko, yerkabuğunda en çok bulunan elementler arasında 23. sıradadır. Çinko, bileşiklerinde (+2) değerlikli olarak bulunur. Oluşturduğu bileşiklerde kovalent bağ yapar [11].

Çinko oksit, doğada “mineral zinkit” olarak bulunur. ZnO bileşiği, şekil 1.1’de gösterildiği gibi hegzagonal yapıda kristalleşmektedir ve örgü sabitleri $a=3,24982 \text{ \AA}$, $c=5,20661 \text{ \AA}$ ve eksenler arasındaki açılar $\alpha=\beta=90^\circ$ ve $\gamma=120^\circ$ ’dir. ZnO birim hücrenin hegzagonal yapısında her Zn atomu, birinci kabukta dört O atomu ve ikinci kabukta on iki Zn atomu ile çevrilmiştir. II-VI bileşiklerinin çoğu ya kübik, ya “zinc blende” ya da “hegzagonal wurtzite” yapısına sahiptir. ZnO bileşiği de II-VI grubuna ait

bir yarıiletkenidir [12,13]. Sınırdaki iyonizitesi, kovalent ve iyonik yarıiletkenler arasındadır.



Şekil 1.1. ZnO'in kristal yapısı [14].

ZnO, yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir ve oda sıcaklığında yaklaşık 3,3 eV'luk doğrudan band geçişli yasak enerji aralığı bulunur [12]. Yaklaşık 60 meV'luk geniş band aralığına sahip ZnO yarıiletken ince filmler, elektronik ve optik aygıtlar için uygun malzemelerdir [12,15,16]. Geniş band aralığına sahip bir materyal kullanılarak üretilen aygıtlar, yüksek kırılma voltajına ve düşük gürültüye sahip olurlar. Ayrıca bu aygıtlar yüksek sıcaklıklarda ve yüksek güçlerde çalıştırılabilirler [12].

ZnO ince filmler kendi doğalarından dolayı n-tipi yapıya sahiplerdir [12]. ZnO yarıiletken malzemenin elektriksel özellikleri ısı ile işlemle veya uygun katkı ile tamamen değiştirilebilmektedir [17]. n-tipi iletkenlik, stokiyoimetriden sapmadan dolayı oluşur. Araya sıkışmış oksijen ve çinko eksiklikleri, olası akseptör düzeyleri yaratabilmesine karşılık, serbest yük taşıyıcılar, oksijen boşlukları ve interstitiyal çinko ile bağlantılı olarak donör düzeylerden kaynaklanır. P-tipi ZnO ince film elde etmek için n-tipi ZnO ince filmleri katkılanması gerekir. P tipi ZnO ince filmler, elektriksel aygıtlar için yapılan uygulamalar açısından oldukça önem taşımaktadırlar. Güvenilir bir p-tipi ZnO ince

filmin üretilmesi ZnO optoelektronik aygıtların gelişimini oldukça hızlandıracaktır. Beyaz renkli olan çinko oksit, 300 °C sıcaklıkta sarı renge döner [12].

Katkı atomu olarak genelde Sn⁺⁴, Al⁺³, In⁺³ ve Ga⁺³ kullanılmaktadır. Katkılı ZnO ince filmlerinin kullanıldığı pek çok uygulama alanı vardır. Sn katkılı ZnO ince filmlerin pratikte kullanılabilmesi için uygun olan özelliklere bakarsak bunlardan birincisi, geçirgenliklerinde artışın gözlenmesidir. İkincisi ise Sn katkılı ZnO ince filmlerinin özdirençlerinde azalma gözlenmesidir ki, bu son zamanlarda üzerinde pek çok araştırma çalışmaları yapılan güneş pilleri yapımı için çok avantajlı durumdur [10].

ZnO iki farklı kristal örgüsüne sahiptir. İlki ince film endüstrisinde geçirgen iletken oksit olarak kullanılan hegzagonal (wurtzite) örgüdür. İkinci yapı ise daha çok jeologlar tarafından bilinen kaya tuzu yapısıdır (yüksek basınçta) (şekil 1.2). ZnO ince filmlerinin yönelimlerinin tanımlanmasında kristalografik yapı önem kazanmaktadır [18]. Tablo 1.1'de ZnO ince film için çeşitli parametrelerin aldıkları değerler gösterilmektedir.

Tablo 1.1. ZnO'in temel fiziksel özellikleri [19,20].

Özellikler	Değerler
Örgü Parametreleri	
a_o	0,32469 nm
c_o	0,52069 nm
Yoğunluk	5,606 g/cm ³
Erime Noktası	2248 K
Görelî Dielektrik Sabiti	8,66
Band Genişliği Enerjisi	3,4 eV, doğrudan
Öz Taşıyıcı Konsantrasyonu	<10 ⁶ cm ⁻³
Uyarılmış Bağlanma Enerjisi	60 meV
Etkin Elektron Kütlesi	0,24
Elektron Mobilitesi (T=300 K)	200 cm ² /Vs
Etkin Hol Kütlesi	0,59
Hol Mobilitesi (T=300 K)	5-50 cm ² /Vs

Yarıiletkendeki elektron geçiş performansları, düşük ve yüksek elektrik alanda farklılıklar gösterir. Düşük elektriksel alanda, ZnO'in sahip olduğu elektronların enerji dağılımı, fazla değişime uğramaz. Çünkü elektronlar uygulanan elektrik alandan fazla enerji alamazlar. Bu nedenle elektron mobiliteleri sabit olacaktır. Saçılma oranı,

elektron mobilitesi ile belirlendiğinden, fazla değişime uğramayacak ve ohm yasasına uyacaktır. Yüksek elektrik alanda, uygulanan elektrik alandan dolayı elektronların enerjileri kendi termal enerjileriyle karşılaştırılabilir. Elektron dağılım fonksiyonu dengede sahip olduğu değerden daha uzak bir değere doğru sapacaktır. Bu elektronlar, örgü sıcaklığından daha yüksek sıcaklığa sahip sıcak elektronlar olmaktadır. Elektron sürüklenme hızları, kararlı durumda sahip oldukları sürüklenme hızından büyüktür. Bu nedenle yüksek frekansa sahip aygıtlar yapmak olasıdır.

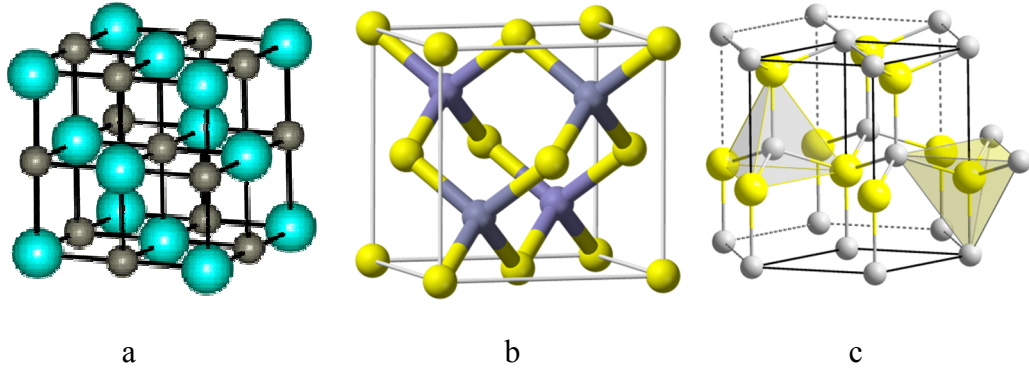
ZnO, ferroelektrik olmayan bir bileşiktir ve oldukça büyük bir elektromekanik çiftlenim katsayısına sahiptir. Bundan dolayı ZnO delay line cihazları ve yüzey akustik dalga cihazları (SAW) için bir transduser olarak kullanılan ve iyi bilinen bir piezoelektrik malzemedir [12].

ZnO ince filmler gaz sensörleri, güneş pilleri, optoelektronik cihazlar, şeffaf iletkenler ve optik dalga kılavuzları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır [16,21-24].

Çinko oksit film hazırlamada kullanılan birçok metot vardır. Bunlar arasında sol-jel metodu, geniş yüzeylere az bir maliyetle uygulanabilmesi ve filmin mikroyapısının kolayca kontrol edilebilmesi sebebiyle tercih edilmektedir. Sol-jel ile hazırlanan filmlerin mikroyapısını ve optik özelliklerini etkileyen birçok parametre vardır. Bunlardan bazıları şunlardır: Sol'un kimyasal kompozisyonu ve konsantrasyonu, kaplama parametreleri, filmin kalınlığı, kaplama yapılan her kat arasında uygulanan kurutma sıcaklığı ve kurutma süresi ve son ısıl işlem sıcaklığıdır [21].

Çinkonun doğada bol miktarda bulunması ve ucuz bir malzeme oluşu çinko oksit ince filmlerin maliyetini düşürmektedir. Çinko oksit filmlerin görünür ışık bölgesinde saydam oluşu nedeniyle saydam iletken malzeme olarak çok büyük ilgi görmektedir. ZnO bileşiğı görünür bölgede yaklaşık % 80 - % 90 optik geçirgenliğe ve 10^{-3} – 10^{+2} Ω cm bölgesinde bir elektriksel dirence sahiptir [27].

Doğrudan ve geniş band aralıklı materyal olan ZnO çeşitli elektronik ve optoelektronik uygulamalar için çok çekici bir materyaldir. ZnO, yarıiletkenlerin içinde yüksek elektrik alanlar için düşünülebilen bir yarıiletkendir [25].



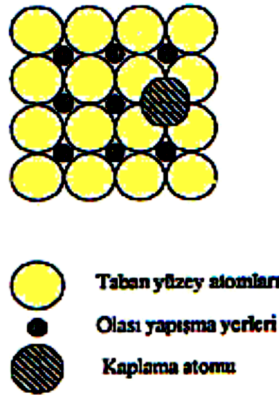
Şekil 1.2. ZnO kristal yapıların gösterimi: (a) kübik kayatuzu (B1) [26] , (b) kübik çinko sülfüt (B3) [27], (c) hegzagonal wurtzit (B4) [28].

Metal-oksit yüzeyindeki oksijen boşlukları elektriksel ve kimyasal olarak aktiftir. Bu boşluklar n-tipi vericiler gibi işlev görür. Genellikle oksitin iletkenliğini önemli ölçüde arttırmırlar. NO_2 ve O_2 gibi yük kabul eden moleküllerin boş yerlere adsorplanmasıyla iletim bandındaki elektronlar önemli ölçüde boşalır ve n-tipi oksidin iletkenliğinde düşmeye neden olur. Öte yandan CO ve H_2 gibi moleküller, yüzeyde tutunan oksijenle reaksiyona girerek yüzeyden sökülmesine neden olurlar. Bu süreç iletkenliğin artması ile sonuçlanır. Birçok metal-oksit gaz sensörü bu prensibe göre çalışır. Katıhal gaz sensörlerinin başında gelen ZnO esaslı malzemeler yüksek sıcaklıklarda ($\sim 400^\circ\text{C}$) CO , NH_3 , alkol ve H_2 algılamada kullanılmaktadırlar [19].

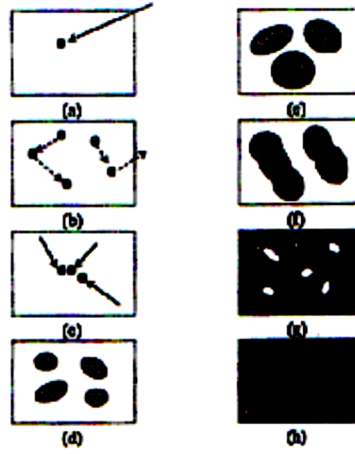
1.2. İnce Filmlerin Büyütülmesi

Film oluşumu işlemi üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, kaplama malzemesinin fiziksel buharlaştırma tekniğinde katı kaynaktan, kimyasal buharlaştırma tekniğinde gaz kaynaktan, çözelti ile kaplama tekniğinde sıvı kaynaktan atomik, moleküler ya da iyonik parçacıklar halinde ayrılmasıdır. İkinci aşama bu parçacıkların doğrudan ya da elektrik ve/veya manyetik alan etkisi ile kaplanacak yüzeye taşınmasıdır. Üçüncü aşama ise kaplanacak yüzey üzerinde katı bir yapı oluşturmak için bu parçacıkların doğrudan ya da kimyasal yolla yoğunlaşmasıdır. İnce film büyümesi üçüncü aşama içindedir.

Kaplama malzemesi, tekniği kadar film büyümesi de kaplamanın karakterini etkiler. İnce film büyütme işlemi Şu Şekilde gerçekteŐmektedir. İlk durumda, taban yüzeyine çarpan parçacıklar, bu yüzeye dik hız bileŐenlerini kaybederler ve taban yüzeyine tutunurlar (Şekil 1.2a). Bu parçacıkların sahip oldukları enerji ile bağlanabilecekleri çok yer vardır. Şekil 1.3'de kare yapıdaki bir taban yüzeyinde uygun yapışma yerleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Taban yüzeyinde yapışma yerleri [8].



Şekil 1.4. Film büyümesi [8].

İkinci durumda ise, taban üzerine tutunan parçacıklar başlangıçta taban ile ısı dengede değildirler, dolayısıyla oldukları yerde hareketsiz kalmazlar, olası yapışma yerlerine sıçrama hareketi yaparlar (Şekil 1.2b). Parçacıklar bu hareket enerjisini ulaşım uzayında ve tabanın sıcaklığından kazanmaktadırlar. Sıçrama için gereken difüzyon

enerjisi yapışma enerjisinden küçük olduğundan sıçrama olasılığı daha yüksektir. Kaplama parçacıkları bu hareketle taban yüzeyinde en uygun durumu bulmaya çalışırlar.

Üçüncü durumda ise, bu hareketlilik esnasında sıçrama dışında diğer kaplama parçacıklarıyla da etkileşerek çarpışma ve birleşme yapmaktadırlar (Şekil 1.2c).

Dördüncü durumda ise, birleşmeye tabana gelen diğer parçacıkların da katılmasıyla atomlar arası bağlanma kuvvetlenir. Böylece yüzeye çarpan parçacıkların gruplara katılma olasılığı artar. Bu kümecikler veya çekirdekler ısı dengede değildirler. Bu nedenle kaplama koşullarına bağlı olarak zamanla yerlerinden kalkabilirler. Eğer kaplama parametreleri bu çekirdeklerin kalkmalarından ziyade yüzeye yapışan diğer çekirdeklerle çarpışması yönünde ise çekirdekler büyümeye devam ederler. Kritik bir büyümeye ulaşıldığında kümecikler termodinamik olarak kararlı hale gelirler ve çekirdeklenme barajı aşılmış olur. Bu aşama “çekirdeklenme” olarak adlandırılır (Şekil 1.2d).

Beşinci durumda ise bu çekirdekler sayıca ve boyutça büyümeye devam ederler ve doyum çekirdek yoğunluğuna ulaşırlar. Çekirdek yoğunluğu ve ortalama çekirdek boyutu tabana gelen parçacıkların enerjisine, birim zamanda tabana ulaşan parçacık sayısına, yapışma, kopma ve ısı difüzyon aktivasyon enerjilerine, tabanın sıcaklığına, fiziksel ve kimyasal yapısına bağlıdır. Bir çekirdek tabanın yüzeyine dik ya da paralel büyüyebilir, fakat film oluşmasının ilk aşamalarında enine büyüme boyuna büyümeden çok daha fazladır. Büyüyen bu çekirdeklere “ada” denir (Şekil 1.2e).

Altıncı durumda ise, film oluşumundaki bir sonraki aşama birleşme aşamasıdır. Bu aşamada küçük adacıklar birleşerek yüzey alanlarını minimum yapmaya gider, başka bir deyişle kararlı hale geçmeye başlarlar. Bu gidiş daha büyük adacıkların oluşmasına yol açar (Şekil 1.2f). Bu gidişi hızlandırmak için yüzeye gelen parçacıkların yüzey hareketliliklerini arttırmak gereklidir.

Yedinci ve son durumda ise, büyük adacıklar birleşirler, dolayısıyla arkalarında kaplanmamış delikler ve kanallar bırakırlar. Bu aşamada filmin yapısı süreksiz adalar yapısından delikli bir yapıya dönüşür (Şekil 1.2g). Bu kanallar ve oyuklarda dolarak film sürekli hale gelir (Şekil 1.2h). Bu birleşmeler ve dolmalar nedeniyle kaçınılmaz olarak yapısal örgü hataları doğar [8].

1.3. Film Kaplama Teknikleri

Görünür bölgede yüksek geçirgenlikli ve düşük dirençli kaplamalar yapma ihtiyacı, farklı kaplama tekniklerinin gelişmesine yol açmıştır. Bu tekniklerden her biri kaplama süreçlerinde kendi avantaj ve dezavantajlarına sahiptir. Örneğin sputtering teknikleri yüksek kaliteli filmler üretmeye yararken, düşük üretim miktarı için bile ekipman maliyeti çok yüksektir. Diğer yandan spray teknikleri çok ucuzdur; fakat üretilen filmler her zaman birbirini tutmamaktadır. Ayrıca farklı araştırmacıların farklı teknikleri kullanarak elde ettiği sonuçlar önemli ölçüde birbirinden farklılık göstermektedir. En iyi film kalitesini elde etmek için optimum katkı konsantrasyonu geniş farklılık göstermektedir. Bu, muhtemelen kaplama parametrelerindeki farklılıktan ve elementlerdeki kirlilikten kaynaklanmaktadır.

Geniş enerji band aralıklı şeffaf oksit filmler; yüksek elektrik iletkenlik, görünür bölgede yüksek optik geçirgenlik ve IR bölgesinde yüksek yansıtma gösterirler. Şeffaf iletken oksit filmlerin bu özelliği onların birçok farklı uygulama alanlarında kullanımına olanak sağlar. Bu bağlamda farklı kaplama teknikleri bu filmlerin özelliklerini belirlemede önemli rol oynar. Çünkü farklı teknikle kaplanan aynı iki malzeme farklı fiziksel özellikler gösterir. Bunun sebebi filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin yapıya, morfolojiye ve kirliliğe güçlü bir şekilde bağlı olmasıdır. Bununla birlikte aynı teknikle kaplanan filmler farklı kaplama parametreleri için içine girdiğinde farklı özellikler gösterebilir. Şeffaf iletken oksit filmler elde etmek için farklı teknikler vardır. Bunlardan bazıları;

- Kimyasal buhar birikimi (CVD)
- Püskürtme kaplama (Spray pyrolysis)
- Sol-jel
- Anodizasyon
- Vakumda buharlaştırma
- Sıçratma (Sputtering)
- İyon ışını destekli kaplama (Ion-assisted deposition)
- Lazer destekli kaplama (Laser-assisted deposition)

şeklinde sıralanabilir [15,22,29-33].

Çinko oksit esaslı kaplamalar son yıllarda büyük ilgi görmektedirler. Çünkü yaygın olarak kullanılan indiyum ve kalay esaslı oksit filmlere göre daha avantajlıdır. İndiyum ve kalay oksit filmler, çinko oksit filmlere göre daha pahalıdır. Saf çinko oksit filmler şeffaftırlar, fakat genellikle yüksek dirence sahiptirler. Stokiyometrik olmayan ve katkılı çinko oksit filmler ise yüksek iletkenliğe sahiptir. Ancak stokiyometrik olmayan filmler yüksek sıcaklıklarda stabil değildir. Pratik uygulamalar için katkılı ZnO filmler daha uygundur. Bu çalışmada kaplama yöntemi olarak sol-jel yöntemi kullanıldığından burada sadece sol-jel yöntemiyle ilgili bilgi verilecektir [29].

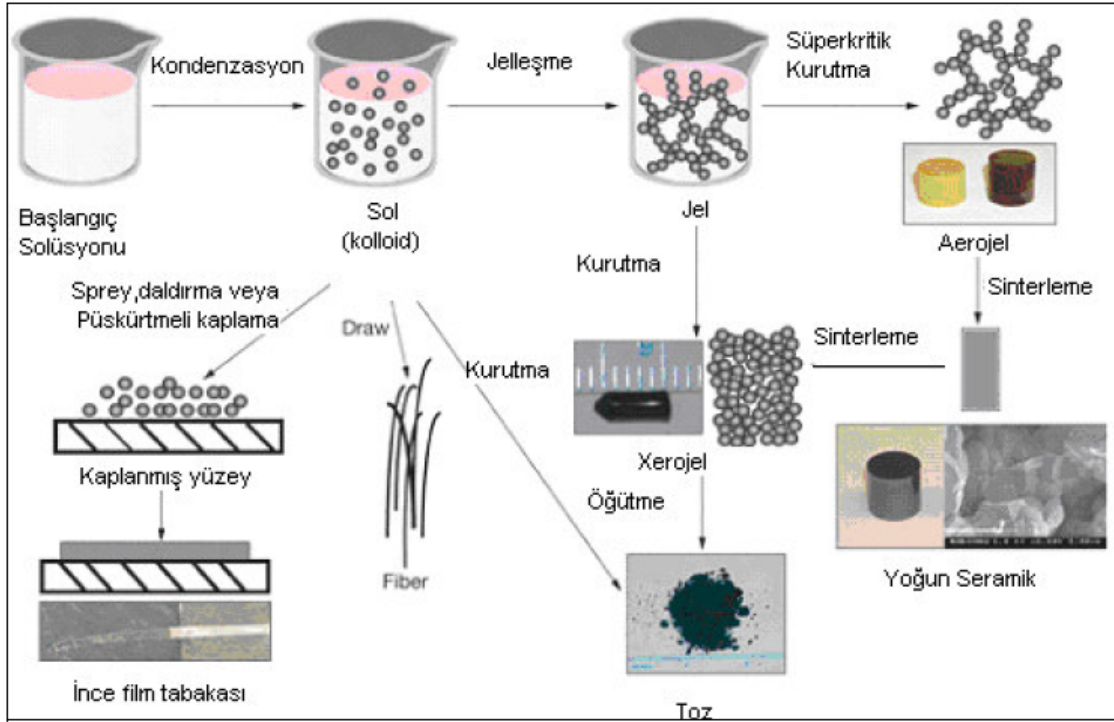
1.3.1. Sol-jel Metodu

Sol-jel üretim metodu laboratuvar koşullarında iyi uygulanabilen bir metot olmasının yanında, büyük ölçekli üretimler için de kullanımını giderek artmaktadır.

Sol-jel yöntemi, başlangıç malzemesi olarak metal bazlı hammaddeler; çoğunlukla da alkoksit çözeltileri kullanılarak metal oksitlerin hazırlanması için uygulanan bir metot olarak bilinir. Şekil 1.5'de sol-jel metodu şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 1.5'de görüldüğü gibi sol, çok küçük katı parçacıkların sıvı içerisinde asılı kalarak homojen bir dağılım gösterdiği denge durumudur. Sıvı içerisindeki parçacıkların boyutu $1\mu\text{m}$ 'den daha küçüktür. Sollar parçacıkların etkileşimine göre tanımlanırlar. Eğer parçacık çözücü etkileşimi zayıf yani içinde dağıldıkları sıvı ile etkileşmeyen katı partikülleri içeren sistemlere liyofobik sol, değilse yani içinde dağıldıkları sıvı ile çok etkileşen katı partikülleri içeren sistemlere ise liyofilik sol olarak adlandırılır.

Jel, sıvı bileşen içeren içyapısı yüksek yoğunlukta sıvı ve katı dağılımına sahip durumdur (şekil 1.5). Bütün sollar jel olmayabilir. Jel için önemli ölçüt en küçük çözücü parçacıkları ile çözünen parçacıklar arasında bağ kurulmasıdır.



Şekil 1.5. Sol-jel yönteminin şematik olarak gösterimi [14].

Sol-jel yönteminde, saf bileşikler içeren inorganik veya metal organik bileşikler kullanılır. Bu bileşiklerin sulu çözeltileri veya organik çözücülerini M-O-M (metal-oksijen-metal) bağları içeren inorganik polimer formuna hidroliz edilir.

Bazı metal oksitleri elde etmek güç olduğundan dolayı bunların tuzlarını reaksiyonlarda kullanmak daha avantajlıdır. Örneğin I ve II. grup elementlerinin uçuculuğu az ve çözünürlükleri iyi değildir. Bu nedenle onların tuzları kullanılır ve bu grup elementlerinin metal tuzları ısıtılarak veya oksitlenme yoluyla kolay bir biçimde dönüştüklerinden dolayı bu reaksiyonlarda daha çok tercih edilirler. Organik asit tuzları olarak, asetatlar, nitratlar, formatlar ve sitratlar kullanılır. Nitratlar daha yaygın olarak kullanılır fakat başlangıç maddesi olarak asetatlar daha uygundur. Çünkü asetatlar daha iyi çözünür ve bazik olduklarından dolayı jelleşme daha hızlı meydana gelir. Sol-jel çözeltisini tuz kullanarak hazırlamak için önce alkoksit bileşiklerinin çözeltisi elde edilir veya birkaç tuzun bileşiği alkol içerisindeki çözeltileri ilk çözelti ile karıştırılarak jel elde edilir.

Sol-jel metodu sade bir biçimde üç kimyasal reaksiyondan meydana gelir. Bunlar kompleks üretme, hidroliz ve polikondensasyon (kondensasyon iki atomun

birleşerek bağ oluşturması ve beraber serbest hareket etmeleri) reaksiyonlarıdır. İlk aşamada oksit karışımını meydana getirecek olan kimyasal bileşiklerin başlangıç maddeleri ile bir karışım hazırlanır, ardından karışımda meydana gelen hidroliz ve polikondensasyon reaksiyonları sonucunda elde edilen ürüne termal işlem uygulanarak oksit meydana getirilir. İki çeşit sol-jel yöntemi vardır; ilki metal tuz çözeltisini kullanarak hazırlanan sıvı bazlı ikincisi ise metal oksit kullanarak hazırlanan alkol bazlı sistemdir. Bu sistem inorganik ve metal organik bileşiklerin organik çözücüler içinde metal-oksijen-metal bağlarından oluşan inorganik polimerlerin meydana gelmesiyle gerçekleşir.

Bu işlemlerde en çok kullanılan metal organik bileşiği metal oksittir. Alkoksit, alkol içerisinde çözünerek, baz yada asit içerisinde çözünerek hidroliz olur. Alkoksit çözeltinin hidrolizi ve yoğunlaşması sayesinde sıvı fazdan daha yoğun sıvı faza geçişi yani jel oluşumu meydana gelir. Bu metotla hazırlanan ürünler homojen ve saf olmaktadır [14].

Sol-jel yönteminin teknolojik olarak en önemli yanı, jelleşmeden önce akışkan sol'un veya çözeltinin daldırma, döndürme veya püskürtme kaplama (spraying) gibi yaygın metotlar ile film hazırlanmasında ideal olmasıdır. CVD, buharlaştırma veya püskürtme gibi geleneksel ince film oluşturma yöntemleriyle karşılaştırıldığında sol-jel yöntemi oldukça az ekipman gerektirdiğinden daha ucuzdur. Bununla birlikte, sol-jel yönteminin diğer yöntemler üzerine en önemli avantajı kaplanan filmin mikroyapısının (gözenek hacmi, gözenek boyutu ve yüzey alanı gibi) mikroskobik özelliklerinin tamamen kontrol edilebilmesidir [29]. Bu özelliklere sahip olduğundan dolayı bu tez çalışmasında kullanılan yöntem sol-jel yöntemidir.

Bu metodun avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

1.3.2. Sol-jel Yönteminin Avantajları

- Kimyasal yönü kontrol edilebilir
- Ham maddelere kıyasla daha homojen numuneler üretilebilir
- Üretilen toz boyutu mikronun altındadır
- Malzeme üretimi için düşük sıcaklıklar yeterlidir
- İnce film yapımı için de elverişlidir

- İstenilen yapı ve kalınlık elde edilebilir.
- Diğer üretim teknikleri ile karşılaştırıldığında daha ucuz bir yöntemdir.
- Çok çeşitli elementlerin katılımıyla yeni ve değişik türde bileşikler elde edilebilir
- Ürünler yüksek saflıkta elde edilir. Ortamdan gelen safsızlıklar ve reaksiyon kabıyla etkileşim oldukça düşüktür. Bu özellikten dolayı optik ürünlerde önemli avantajlar sağlar.
- Polimerizasyon sırasında jel içinde değişik zincir uzunluğunda polimer moleküllerinin bulunması ve işlem sırasında bunların kısmen faz ayırımına uğramaları nedeniyle yapıda bileşim farklılığı göstermeden yapısal değişiklikler gösteren bölgelerin oluşabilmesi mümkündür.
- İşlem için gerekli ısı işlem sıcaklıkları genellikle 1000 °C'nin altında olduğundan önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanır.
- Eritme işleminde buharlaşmadan kaynaklanan kayıplar bu yöntemde en aza indirilir [13,14,15,22,34,35].

1.3.3. Sol-jel Yöntemin Dezavantajları

- Hammadde fiyatları yüksek olduğundan uygulamalar bazı özel seramikler ve kaplama üretimi ile sınırlı kalabilir.
- İşlem süresi uzundur.
- İşlem süresinin uzunluğu üretim miktarını kısıtlayıcı bir faktördür. Seri olarak malzeme üretmek ve kaplama yapmak çok zordur.
- Kullanılan organik hammaddelerin sağlığa zararlı olmaları uygulamalarda özel koruyucu tedbirler alınmasına neden olduğundan maliyet artar.
- Jel içinde kalan gözenekler, hidroksil iyonları ve karbon atomları bazı özel amaçlı ürünlerde hataya neden olur.
- Üretilen tozların maliyeti yüksektir
- Yapım esnasında büzülme miktarı çoktur.
- Yapıda çatlaklar yer alabilir.
- Yapıda OH (hidroksil) veya C grubu bulunabilir şeklinde sıralanabilir [14,35].

Sol-jel teknolojisinin ilk ticari uygulamaları film ve kaplamalardır. Daldırarak veya döndürerek oluşturulan ince filmlerde çok az malzeme kullanılır ve sol-jel metodunun birçok dezavantajının üstesinden gelerek çatlaksız filmler hızlıca elde edilebilir. Diğer kaplama yöntemleri ile kaplanamayan boru, tüp ve çubuk gibi eksen simetrisine sahip olan taşıyıcıları veya düzlem taşıyıcıların her iki tarafını uniform şekilde kaplamak bu metot ile mümkündür. Zamanla sol-jel metodu ile kaplanan filmlerin, elektronik, koruyucu, membran (zar) ve sensör uygulamaları gibi birçok yeni kullanım alanı doğmuştur. Sol-jel metodu ile hazırlanan ince film ve kaplamaların değişik uygulama alanları şunlardır;

1. Optik kaplamalar

- Renkli
- Yansıtımayıcı
- Optoelektronik
- Optik hafıza

2. Elektronik kaplamalar

- Foto anodlar
- Yüksek sıcaklık süperiletkenler
- İletken filmler
- Ferroelektrik, elektro-optik filmler
- Dielektrik filmler

3. Koruyucu kaplamalar

- Korozyona dirençli filmler
- Mekanik (çizilme ve yıpranmaya dirençli, dayanıklılık artırıcı, pürüzlük giderici) filmler
- Pasif (elektronik) filmler

4. Diğer amaçlar için kullanılan kaplamalar

- Gözenekli filmler
- Çeşitli türden filmler

Ayrıca son yıllarda sol-jel yöntemi ile ultra-ince film hazırlama teknikleri de hızla gelişmektedir. Bu teknikler moleküler duyarlıkta kalınlık kontrolü ile polimer, boya molekülleri, bio-moleküller, nano-parçacıklar, iki boyutlu anorganik yapraklar ve moleküler toplanma (agregasyon) içeren farklı nano-kompozit filmlerin üretilmesine olanak sağlamaktadırlar [29].

1.3.4. Sol-jel ile İnce Film Kaplama Metotları

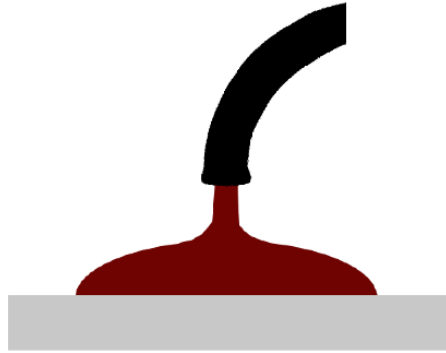
Başlıcaları şunlardır: Daldırma ile kaplama metodu, Döndürme ile kaplama metodu, Püskürtme metodu (bir püskürtme tabancası vasıtası ile malzemenin taşıyıcı üzerine püskürtülmesi esasına dayanır), Elektroforez (taşıyıcı çözeltiliye daldırılır ve çözeltiliye bir dış elektrik alan uygulanarak çözeltideki yüklü parçacıkların taşıyıcıya yapışması sağlanır) metodu ve Termoforez (sıcaklık değiştirilerek soldeki parçacıklar net bir sıcaklık farkına maruz bırakılır ve parçacıkların taşıyıcıya yapışması sağlanır) metodudur. Aşağıda daha ayrıntılı olarak bahsedilen daldırma veya döndürme kaplama metotlarında süreç kısaca şu şekilde olur: Taşıyıcı belirli bir daldırma-çekme hızında organo-metalik çözeltiliye daldırılıp çıkarılır veya bir pipet yardımıyla döndürülecek olan taşıyıcının üzerine damlatılır. Daha sonra taşıyıcı, çözeltili fazlalığını buharlaştırmak için fırına konur. Filmin kalınlığı çözeltilinin viskozitesine bağlı olduğu gibi, daldırma-çekme veya döndürme hızlarına da bağlıdır. Kaplama sürecini etkileyen diğer faktörler ise; sıcaklık, nem ve çözeltilinin tazeliğidir [29]. Bu tez çalışmasında kullanılan kaplama metodu döndürme kaplama metodu olduğundan aşağıda sadece bu metot hakkında açıklama yapılmıştır.

1.3.4.1. Döndürme ile Kaplama Metodu

Döndürerek kaplama metodu, mikroelektronik endüstrisi için geliştirilmiştir. Bu metot, bazı sınırlamalar ile birlikte, sol-jel kaplamaların hazırlanmasında hızlı ve kullanışlı bir yöntemdir. Bu kaplama metodu ile nanometre mertebelerinden mikron mertebelerine kadar değişen geniş bir aralıkta film kalınlıkları elde etmek mümkündür.

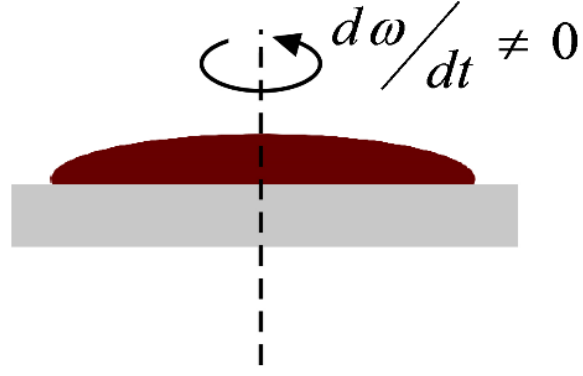
Bu yöntem taşıyıcılar döndürülürken üzerine damlatılan sol'un merkezci kuvvetin etkisi ile taşıyıcı üzerine yayılması esasına dayanır [29].

Bu metot beş aşamaya ayrılır; (1) Damlatma, (2) Döndürme başlangıcı, (3) Döndürme, (4) Döndürme sonu ve (5) Buharlaştırma. Damlatma aşamasında, dönecek yüzeye sabitlenmiş olan taşıyıcı üzerine sol damlatılır. Başlangıçta durmakta olan taşıyıcı döndürülür. Dönme sırasında taşıyıcı üzerine damlatılmış sol, merkezkaç kuvvetin etkisi ile taşıyıcının tüm yüzeyine yayılır [29]. Bu adımda önemli olan solüsyonun büyük partiküllerden arındırılmış olması ve yüzeye yapışabilir bir özellik göstermesidir [19].



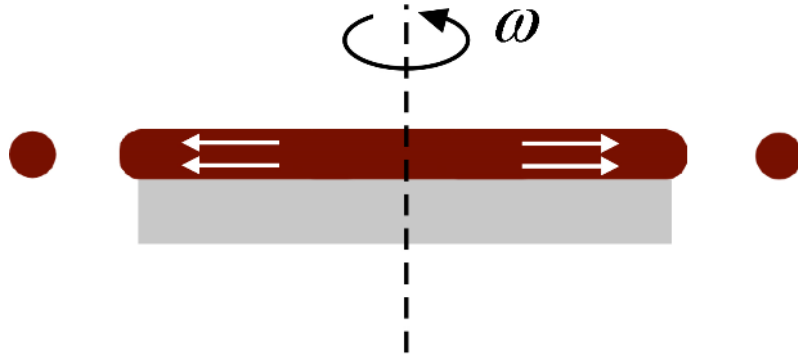
Şekil 1.6. Solüsyonun döndürme ile kaplamada numune yüzeyine damlatılması [19].

İkinci adımda solüsyonun tabana yayılması ve fazla solüsyonun atılarak ince filmin oluşması için tabanı ivmelendirilmesidir. Bu aşamada hız < 500 rpm'dir.



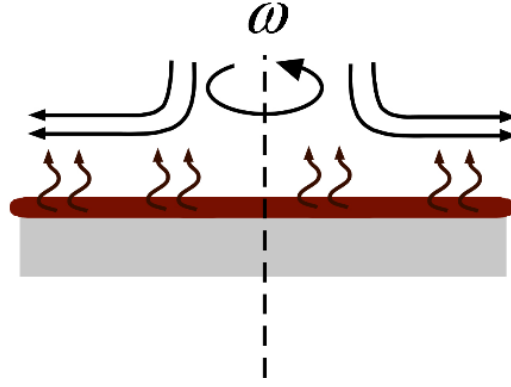
Şekil 1.7. Döndürme ile kaplamada çözeltinin düşük hızlarda döndürülmesi [19].

Üçüncü adım olarak da taban sabit bir hızla döner ve solüsyondaki viskoz kuvvetleri akışkanın daha çok incelmesine engel olur. Hız $\sim 2000 - 4000$ rpm'dir.



Şekil 1.8. Döndürme ile kaplamada çözeltinin yüksek hızlarda döndürülmesi [19].

Dördüncü adımda film incelendiğinden viskoz kuvvetlerinin etkisinin yerini buharlaşma alır ve jel oluşumu gerçekleşir. Hız ~ 500 rpm'dir.



Şekil 1.9. Döndürme ile kaplamada çözeltilerin düşük hızlarda döndürülerek jelleşmenin sağlanması [19].

Beşinci aşamada ise döndürme sonunda filmin kalınlığı taşıyıcı yüzeyinde her yerde aynı olur. Döndürme kaplamada genelde döndürme hızının yükseltilmesi filmin homojen kaplanmasını artırır [19].

Döndürme sonu aşamasında ilk başta oluşan düzgün filmin kalınlığı,

$$h(t) = \frac{h_0}{\left(1 + \frac{4\rho\omega^2 h_0^2 t}{3\eta}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.1)$$

ile verilir. Burada h_0 , ilk kalınlık; t , zaman; ω , açısal hız; ρ , yoğunluk ve η viskozitedir. Bağlantıda ω ve ρ sabit kabul edilir. Başlangıçta düzgün kalınlıkta olmayan filmler bir süre sonra denkleme uyacak şekilde uniformluğa yönelirler [29].

Döndürme kaplama metodunun diğer kaplama metotlarına göre bazı avantajları şunlardır:

- Büyük taşıyıcılar için bile sadece az bir miktar kaplama sıvısı gerekir. Sıvı fazlası normal olarak tekrar kullanılamaz
- Çok hızlı bir metottur
- Çok katmanlı uygulamalar için iyi bir yöntemdir

Bu metodun dezavantajları ise;

- Sadece dairesel ve dairesele yakın taşıyıcılar için iyi bir metottur
- Düzensiz şekillerin köşe ve kenarlarında hava ve sıvının akması çok iyi bir şekilde sağlanmalıdır
- Temiz tutulması zordur
- Büyük taşıyıcıların (> 800) homojen kaplanması zordur
- Çözücünün hızlı buharlaşması durumunda homojen kaplamaların elde edilememesi; bu problemi çözmek için yüksek kaynama noktalı çözücülerin kullanılması durumunda ise istenilen film kalınlığının elde edilmesinin zorlaşması olarak verilebilir [29].

1.4. Optik Özellikler

Bir materyale gelen elektromanyetik dalganın materyalde bulunan elektriksel yükler ile etkileşmesi sonucunda enerji kaybına uğraması absorpsiyon olarak adlandırılır. Bu enerji kaybı materyalin atomları tarafından kullanılır [17]. Elektromanyetik ışınım, bir madde ile karşılaştığında madde üzerine dik gelmiyorsa; kırılabilir, yansiyabilir, saçılabilir veya absorplanabilir. Kuantum teorisine göre hc/λ enerjili bir foton, atom tarafından absorplanırsa atomun temel seviyesindeki elektronlar uyarılır ve enerjisi daha büyük olan kararsız uyarılmış enerji seviyelerine geçerler. Elektronik seviyeler arasındaki geçiş enerjisi,

$$E_i - E_o = hc/\lambda \quad (1.2)$$

Planck eşitliği ile verilir [3]. Burada E_i ve E_o , sırasıyla uyarılmış ve temel seviyelerin enerjisi; h , Planck sabiti; c , ışık hızı ve λ , absorplanan ışığın dalga boyudur. Denklemden belirtilen enerji farkı her madde için özgül olduğundan, absorplanan ışının frekanslarının incelenmesi numunenin bazı özelliklerini belirlemede kullanılır [3].

Yarıiletkenlerin band aralıklarını belirlemek için en yaygın şekilde kullanılan metod optik absorpsiyon metodudur. Absorpsiyon işleminde enerjisi belli bir foton, bir elektronu düşük enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır.

Kalınlığı x olan bir materyal üzerine gelen I_0 şiddetindeki bir ışın ile materyali geçen ışın şiddeti I arasında,

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1.3)$$

bağıntısı vardır [17]. Burada; I_0 materyale gelen elektromanyetik dalganın şiddetini; I , x kalınlıklı materyalden geçen elektromanyetik dalganın şiddetini; α , lineer absorpsiyon katsayısını göstermektedir.

Lineer absorpsiyon katsayısı α , elektromanyetik dalganın dalga boyuna ve materyale bağlıdır. Denklem (1.3)'den görüldüğü gibi lineer absorpsiyon katsayısı büyüdükçe materyali geçen ışın şiddeti de o derece azalacaktır [17].

Optik absorpsiyon yöntemi; katı madde tarafından absorplanan elektromanyetik ışının frekanslarının incelenmesi ilkesine dayanan spektrum yöntemidir.

Yarıiletkenlerde elektromanyetik ışınımla, yüklü taneciklerin etkileşmeleri sonucu ışığın absorplanmasının belirgin nedenleri vardır. Kristal kusurları dikkate alınmadığında bu nedenler;

1. Kristalde titreşimlerin oluşması,
2. İzinli bantlardaki elektron ve hollerin uyarılması,
3. Eksiton (bağlı elektron-hol çifti) oluşturulması,
4. Yasak enerji aralığı içindeki yerleşik seviyelerin uyarılması,
5. Valans bandından iletim bandına yasak enerji aralığını geçecek şekilde elektronların uyarılması, şeklinde olabilir.

Ayrıca yarıiletkenlerde band yapısından dolayı gelen ışının absorplanması farklı şekillerde gerçekleşir. Bu nedenle birbirinden farklı absorpsiyon olayları meydana gelir. Bu olaylar;

- a) Temel absorpsiyon olayı,
- b) Eksitonların absorpsiyonu,
- c) Serbest taşıyıcıların absorpsiyonu,
- d) Katkı atomlarının (impurity) absorpsiyonu,

- e) Sıcak elektron yardımıyla absorpsiyon,
- f) Eş elektronik tuzaklara (isoelectronic trap) bağlı absorpsiyon,
- g) Akseptör-Donör arası geçişler,
- h) Band içi geçişler,
- i) Örgü absorpsiyonudur.

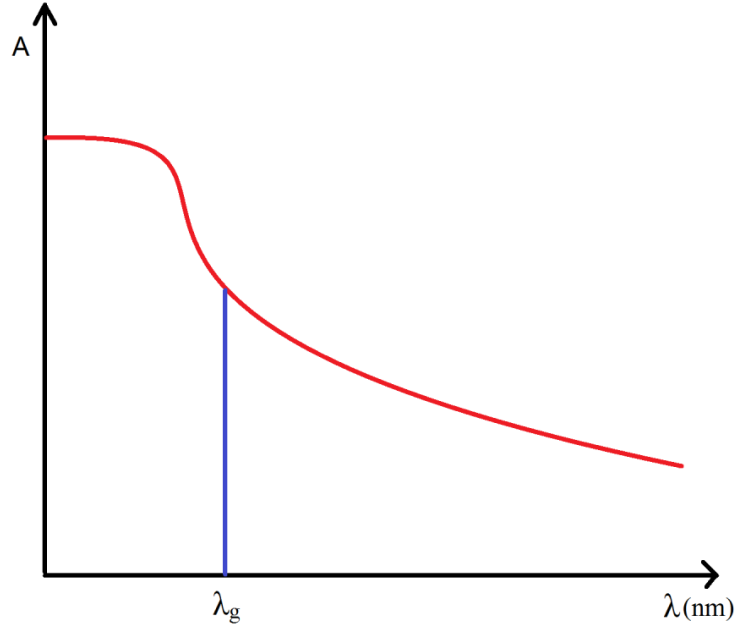
Bu absorpsiyon olaylarından bazıları bir yarıiletken materyalde aynı anda birlikte gerçekleşebilir [3].

1.4.1. Temel Absorpsiyon Olayı

Yarıiletkenlerde en önemli absorpsiyon olayı, bir elektronun bir foton soğurarak valans bandından iletim bandına geçmesiyle oluşur. Dolayısıyla bu olay, temel absorpsiyon olayı olarak adlandırılır. Temel absorpsiyon, absorpsiyonda hızlı bir artış olarak kendini gösterir ve bu yarıiletkenin enerji aralığının belirlenmesinde kullanılır [17].

Yarıiletkenlerde valans bandındaki elektronlar yasak enerji aralığını geçebilecek kadar enerji alırlarsa iletim bandına geçebilirler. Valans bandındaki bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için gereken minimum enerji, iletim bandının alt kıyası ile valans bandının üst kıyası arasındaki enerji farkı kadardır [3].

Temel absorpsiyon olayında bir elektron, materyale gelen ışın demetinden bir foton absorplayarak valans bandından iletim bandına geçer. Bu geçiş sonucunda valans bandında bir hol oluşur. Bu geçişin gerçekleşmesi için materyal üzerine düşen foton enerjisinin, en az yarıiletken materyalin yasak enerji aralığına eşit veya bu değerden daha büyük olması gerekir.



Şekil 1.10. Yarıiletkenlerde gelen ışık- dalga boyu absorpsiyon grafiği [17].

Bu nedenle gelen fotonun frekansı ν ,

$$\nu \geq E_g / h' \quad \text{veya} \quad \nu \geq \nu_o \quad (1.4)$$

olmalıdır. $\nu_o \geq E_g/h$ frekansı absorpsiyon sınırı olarak adlandırılır. Burada; E_g , yasak enerji aralığı; h ; Planck sabitidir [17]. Denklem (1.4)'den görüldüğü gibi yarıiletkenler düşük frekans veya yüksek dalga boyulu ışınları absorplayamazlar. Çünkü yüksek dalga boyulu ışınların enerjisi valans bandındaki elektronların iletim bandına geçmesi için yeterli değildir. Bu nedenle absorpsiyon için bir sınır değeri tanımlanabilir. Bu sınır değerine absorpsiyon sınırı denir. Bu sınır değerindeki fotonun dalga boyu λ_g ;

$$\lambda_g = hc / E_g \quad (1.5)$$

şeklinde yazılabilir [17]. Burada c , ışığın boşluktaki hızını göstermektedir. Yarıiletken bir materyal için temel absorpsiyon spektrumu şekil 1.10'de gösterilmiştir. Bu absorpsiyon spektrumu incelendiğinde, λ_g dalga boyuna yakın dalga boylarında, absorpsiyonda sürekli bir artış gözlenmektedir. λ_g dalga boyundan sonra, absorpsiyon bir denge değerine ulaşmaktadır. Bu nedenle yarıiletken materyal, λ_g dalga boyundan

büyük dalga boylarında absorplama yapmadığından hemen hemen geçirgen özellik göstermektedir. λ_g dalga boyundan küçük dalga boylarında ise kuvvetli absorplayıcı özellik göstermektedir. Böylece, şekilde görülen bu iki bölgeyi birbirinden ayıran sınıra temel absorpsiyon sınırı adı verilmektedir. Dalga boyunun daha düşük değerlerinde ya da yüksek enerjili durumlarda foton sayısı sabit kaldığından absorpsiyon sabit kalmaktadır. Çünkü enerji artışı foton sayısını arttırmamaktadır [3,36-38].

Yarıiletkenlerde temel absorpsiyon sınırında doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki tür geçiş olayı vardır [17].

1.4.1.1. Doğrudan Band Geçişleri

Doğrudan band geçişinde, Şekil 1.11’de görüldüğü gibi yarı iletkenin iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değerinde ise geçişler doğrudan olmaktadır ($\Delta k = 0$) [37,39-41]. Yarıiletkende E_i , ilk durum ve E_f , son durum enerji seviyesi ise,

$$E_f = h\nu - E_i \quad (1.6)$$

ile verilmektedir [17]. Parabolik bandlarda,

$$E_f - E_g = \frac{(\hbar')^2 k^2}{2m_e^*} \quad (1.7)$$

ve

$$E_i = \frac{(\hbar')^2 k^2}{2m_h^*} \quad (1.8)$$

ile verilir [17]. Burada; m_e^* , elektronun etkin kütlesi; m_h^* , holün etkin kütlesini göstermektedir. Denklem (1.7) ve denklem (1.8)’i denklem (1.6)’da yerine yazarsak,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (1.9)$$

bağıntısı elde edilir [17]. Doğrudan geçişlerde eksiton oluşumu veya elektron-hol etkileşimi dikkate alınmazsa absorpsiyon katsayısı α , gelen fotonun enerjisine

$$\alpha (h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^m \quad (1.10)$$

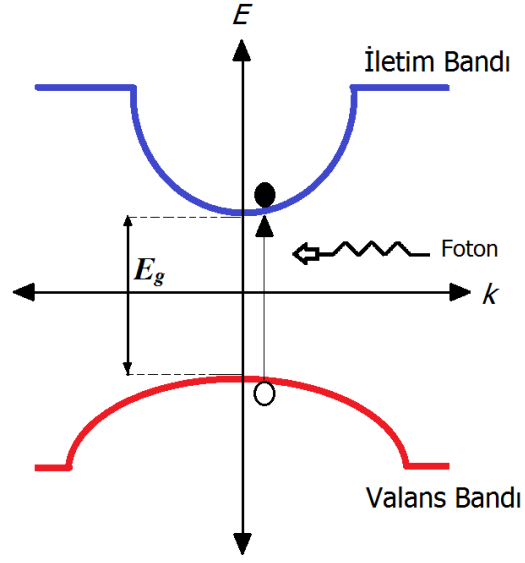
ifadesiyle bağlıdır [17]. Burada A^* sabiti,

$$A^* \approx \frac{q^2 \left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{3/2}}{n_0 c h^2 m_e^*} \quad (1.11)$$

bağıntısı ile verilir [17]. Burada n_0 kırılma indisidir. Doğrudan band geçişinde α ile $h\nu$ arasındaki bağıntı,

$$\alpha h\nu \sim (h\nu - E_g)^m \quad (1.12)$$

ile verilir [13,42]. Burada; m , 1/2 (izinli geçiş) veya 3/2 (izinsiz geçiş) değerlerini alabilen bir sabittir. Ayrıca denklem (1.12)'de $\alpha h\nu$ 'yü sıfır yapan değer yarıiletkenin yasak enerji aralığı değerini vermektedir [17,37,43].



Şekil 1.11. Bir yarıiletkenin doğrudan band geçişinin şematik gösterimi [39].

Doğrudan band geçişinde elektronun dalga vektöründe ya da momentumunda bir değişiklik olmaz. Dolayısıyla doğrudan band geçişlerinde hem momentum, hem de enerji korunur [32,44].

1.4.1.2. Dolaylı Band Geçişleri

Dolaylı band geçişinde, yarıiletkenin iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değerine karşılık gelmiyorlarsa ($\Delta k \neq 0$), geçişler dolaylı olarak adlandırılır (şekil 1.12) [17,39]. Dolaylı band geçişlerinde, elektron geçişi sonucu oluşan hol ve elektronun k değerleri birbirinden farklıdır. Bu farkı gelen foton, momentumu çok küçük olmasından dolayı karşılayamaz. Dolayısıyla valans bandından iletim bandına bir elektronun; momentumun korunumunu sağlayarak geçiş yapabilmesi için, ortamdan bir fononun absorplanması ya da ortamda bir fononun üretilmesi gerekmektedir [3]. Dolaylı geçişlerde enerji korunur fakat momentum korunumu için bir fononun emisyonu veya absorpsiyonu gereklidir. Bu iki geçiş,

$$h\nu_e = E_f - E_i - E_p \quad (\text{Fonon emisyonu durumunda}) \quad (1.13)$$

$$h'\nu_a = E_f - E_i + E_p \quad (\text{Fonon absorpsiyonu durumunda}) \quad (1.14)$$

ile verilir [17]. Burada; E_p fonon enerjisidir; (fonon emisyonu durumunda); fonon absorpsiyonlu geçiş için absorpsiyon katsayısı $h'\nu > E_g - E_p$ için,

$$\alpha_e(h'\nu) = \frac{A(h'\nu - E_g + E_p)^m}{\exp\left[-\frac{E_p}{k_B T'}\right]} \quad (1.15)$$

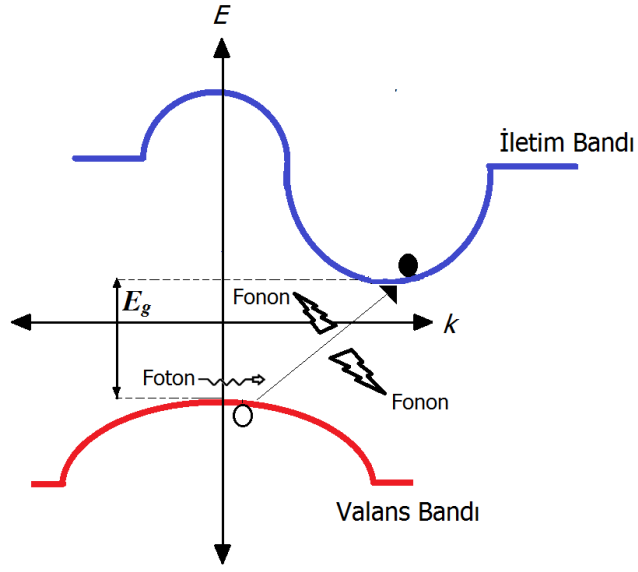
ile verilir [17]. Fonon emisyonlu geçiş için absorpsiyon katsayısı $h'\nu > E_g + E_p$ için,

$$\alpha_e(h'\nu) = \frac{A(h'\nu - E_g - E_p)^m}{1 - \exp\left[-\frac{E_p}{k_B T'}\right]} \quad (1.16)$$

ile verilir [17]. Hem fonon emisyonu hem de fonon absorpsiyonu olduğu zaman α ile ν arasındaki bağıntı,

$$\alpha(h'\nu) = \frac{A(h'\nu - E_g + E_p)^m}{\exp\left[-\frac{E_p}{k_B T'}\right]} + \frac{A(h'\nu - E_g - E_p)^m}{1 - \exp\left[-\frac{E_p}{k_B T'}\right]} \quad (1.17)$$

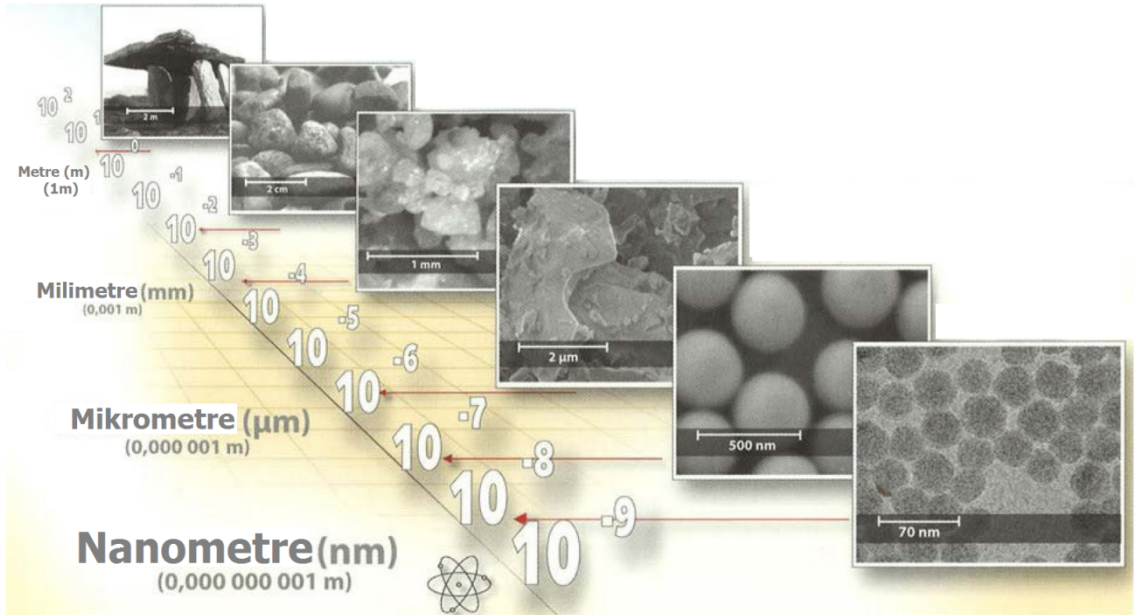
ile verilir [17]. Burada; m dolaylı band geçişli bir yarıiletken için 2 (izinli geçiş) veya 3 (izinsiz geçiş) değerlerini alabilen bir sabiti göstermektedir.



Şekil 1.12. Bir yarıiletkende dolaylı band geçişinin şematik gösterimi [39].

1.5. Nanoteknoloji

Bilimsel olarak metrenin milyarda biri büyüklüğünü temsil eden nano teknik ölçü birimi, Latince’de cüce anlamına gelmektedir. Şekil 1.13’de boyut aralığının şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 1.13. Boyut aralığının şematik gösterimi [45].

Nanoteknoloji; maddeyi metrenin milyarda biri büyüklüğündeki çok küçük boyutlara indirerek yeni özellikler kazandıran, atomların tek tek kullanılarak, yalnızca çalışabilen değil, iş gören, makro, farklı niteliklere sahip aygıtların üretilmesi ve kullanılmasını amaçlayan bir alandır. Nanoteknolojide yapılar 100 nm'den küçüktür ve bu 100 nm insan saçının kalınlığının 1000'de biri kadardır. Bu 1-100 nm aralığındaki partiküller nanopartiküller olarak tanımlanmaktadır [46].

Nanobilimi önemli miktarda teorik ve deneysel bilgi birikimi esasına dayansa da henüz gelişiminin başındadır. Nanobilim fizik, kimya, biyoloji ve malzeme bilimlerinin kurallarını ve yöntemlerini kullanarak atomların dizilişi, maddenin nanoboyutlarda yeniden yapılandırılmasını ve karakterizasyonunu inceler. Nanoteknoloji ise nanobilimin bulguları ile geliştirilen çıktılarını mühendislik disiplini ile ürüne dönüştürür [47].

Nanoteknoloji, kirlenmeyen kumaşlar, nano boyalar, nano robotlar ile kanserli hücrelerin tespit ve tedavisi, nanosensörler gibi birçok alanda etkisini göstermektedir. Bir katının büyüklüğü bir ya da daha fazla boyutta indirgenirse fiziksel, manyetik, elektriksel ve optik özellikleri önemli derecede değişir ve nanoparçacığın temel elektronik ve titreşimsel uyarımları kuantumlu olmaya başlar, bu kuantumluluk olayları genellikle 1-100 nm büyüklüğündeki oranlar için önemlidir [48].

Nanoteknoloji fizik, kimya, biyoloji gibi temel bilimlerin yanında tıp, eczacılık, malzeme bilimi ve mühendislik gibi yan bilimleri de içine alan disiplinler arası bir bilim dalı olarak ortaya çıkmıştır. Nanoteknolojinin amacı; sadece faydalı özelliklere sahip nanomalzeme yapmak değil, aynı zamanda çok küçük mekanik aygıtlar, robotlar ve dönüştürücüler gibi elektriksel aygıtlarda yapmaktır [48].

1.5.1. Gelecekte Nanoteknoloji

Önümüzdeki birkaç on yıl içerisinde nanoteknoloji sayesinde canlı içinde hastalıklı birimleri tanıyabilen ve iyileştiren, cerrahi müdahale yapabilen nanorobotlar geliştirilebilecek, kirliliği önleyen nanoparçacıklar ile çevreci fabrikalar tabiatı daha az kirletecektir. Ulusal güvenliği ilgilendiren konularda nano malzeme bilimi, yeni savunma sistemlerinin geliştirilmesinde, haber alma ve gizlilik konularına yönelik çok küçük boyutlarda aygıtların yapılmasında kullanılacaktır. Birim ağırlığı şimdikinden 50

kat daha hafif ve daha dayanıklı malzemeler üretilebilecektir. Bu malzemelerin kullanımı ile günlük yaşamda kullanılan tekstil benzeri ürünler değişebileceği gibi, uzay araştırmalarında ve havacılıkta yeni roket ve uçak tasarımlarının ortaya çıkması mümkün olacaktır. Bilgisayar çağının başları olan 1950'lerden bu yana yaklaşık her 18 ayda bir bilgisayar performansının iki katına çıktığı ve büyüklüğünün yarıya indiği bilinmektedir (Moore kuralı). Bu kural 2020'li yıllara kadar geçerliliğini koruyacaktır. Bu yıllarda, üretilen bilgisayarlarda temel aygıtlar moleküler boyutlara indirgenebilecektir. 2010'lu yıllarda 40 milyon transistörlü bir işlemci, 2015 yılında 5 milyar transistörden oluşacaktır. Bu şekilde bilgi işleme hızı artarken enerji tüketimi azalacaktır.

Nanoteknoloji devriminin insanlığın yakın geleceğinde meydana getireceği değişiklik sadece ana hatları ile tahmin edilebilir. Endüstri devrimlerinin günümüzdeki son halkası olan nanoteknoloji önümüzdeki birkaç on yıl içinde uygarlığa damgasını vuracak ve bu gelişmelere hazırlık açısından zayıf ve güçlü ülkeler arasındaki fark artacaktır.

Nanoteknoloji gelecek 10-15 yıl içinde önemli çıktılarını ile yeni pazar alanlarına sahip olacaktır. Avrupa'da, ABD'de ve Japonya'da nanoteknoloji araştırma merkezleri, üniversitelerde bölümler kurulduğu ve uzman kadroların bu merkezlerde ulusal ve ticari çıkarılara yönelik olarak bilgi ve teknoloji ürettikleri gerçektir. Nanoteknoloji ile teknoloji açısından ülkeler arasındaki ara kapanamayacak ve nanoteknolojiye sahip olan ülkelerin refah seviyesi, ulusal savunması ve ekonomisi daha güçlü bir konuma gelecektir.

Wang (2009) tarafından bildirildiğine göre nanoteknolojide aktif olarak çalışılan bir boyutlu nanoyapılar şunlardır: Karbon nanotüpler, Silikon nanoteller ve ZnO nanotellerdir. ZnO nanoteknoloji için en etkin nanomateryallerden biridir [47].

1.5.2. Nanoteknolojinin Avantajları

Nanoteknolojinin önemi, atomlar ve moleküller seviyesinde (1-100 nm) çalışarak, gelişmiş ve/veya tamamen yeni fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklere sahip yapılar elde edilmesine imkân sağlamasından kaynaklanmaktadır. Teknik açıdan açıklamak gerekirse, malzeme özellikleri ve cihazların çalışma prensipleri, genel olarak

100 nm'den büyük boyutları temel alarak yapılan varsayımların sonucunda ortaya çıkarılmış geleneksel modelleme ve teorilere dayanmaktadır. Kritik uzunluklar 100 nm'nin altına indiğinde ise geleneksel teori ve modeller ortaya çıkan özellikleri açıklamakta çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Nanoteknoloji işte burada resme girmektedir. Daha sağlam, daha kaliteli, daha uzun ömürlü ve daha ucuz, daha hafif, daha küçük cihazlar geliştirme isteği birçok iş kolunda gözlenen eğilimlerdir. Minyatürizasyon olarak tanımlanabilecek bu eğilim birçok mühendislik çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Minyatürizasyonun sadece kullanılan parçaların daha az yer kaplamasından çok daha önemli getirileri vardır. Minyatürizasyon; üretimde daha az malzeme, daha az enerji, daha ucuz ve kolay nakliye, daha çok fonksiyon ve kullanımda kolaylık olarak uygulamada kendini göstermektedir.

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren birçok endüstride kullanılan toleranslar sürekli iyileştirilmiş, üstün kalite anlayışı geliştirilmiştir. Mikroteknoloji ürünü olarak tanımlayabileceğimiz parçalar otomobil, elektronik, iletişim gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır olmuştur. Günümüzde ise mikroteknolojilerden daha küçük teknolojilerin, nanoteknolojinin, kullanımı yaygınlaşmaktadır. Nanoteknoloji sayesinde sanayide, bilişim teknolojilerinde, sağlık sektöründe ve daha birçok alanda yeni ürünler geliştirilecek, günümüzün üretim süreçleri ve yöntemleri değişecektir. Bu teknolojiye yatırım yapılan ülkelerde ekonomik değerler yaratılacak ve toplumların yaşam kalitesi gelişecektir [49].

1.6. Gaz Sensörleri

Teknolojideki hızlı gelişim bir yandan yaşam tarzımızı kolaylaştırırken diğer yandan, insan ve çevre sağlığına son derece zarar vermektedir. İnsana ve çevreye verilen zararları önlemek amacıyla, çevreye yönelik araştırma ve uygulamalar hızla artmaktadır.

Zararlı gazların tespiti ve kontrol edilmesi çevrenin korunması ve insan sağlığı açısından çok önem taşımaktadır. Bu yüzden hem zararlı gazların yarattığı sağlık tehlikelerinden korunmak hem de bazı işlemler sonucu üretilen veya tüketilen gazların kontrol edilmesi açısından son zamanlarda gaz sensörleri ile ilgili çalışmalar artmıştır [50].

Sensörler otuz yılı aşkın süredir birçok alanda kullanılmaktadır. Sensörlerin özellikle otomasyon ve robot teknolojilerinde kullanımı günümüzde en yaygın kullanım alanıdır. Sensörlerin kullanım alanlarının her geçen gün artması birçok şirketin ve araştırma kurumunun çalışmalarını bu yöne kaydırmıştır.

Genel olarak sensörler fiziksel ya da kimyasal verileri uygun ve kullanılabilir elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlardır [6,7,51]. Diğer bir tanımı ise giriş değişkenlerini uygun sinyallere dönüştüren bir ölçüm zincirinin parçasıdır.

Sensörlerin çalışma prensibi ve üretimlerine göre bazı basit ve özel gereklilikleri taşımak zorundadır. Bu gereklilikler yüksek hassasiyet, lineerlik, yüksek doğruluk, tekrar üretilebilirlik, yüksek cevap hızı, seçicilik, geniş ölçüm aralığı, geniş çalışma sıcaklığı, kararlılık, basit kalibrasyon, güvenilirlik, uzun süre çalışabilme, uzun kullanım süresi, ısı, titreşim, asit, gaz gibi ortam etkilerine dayanım, maliyeti düşük, hafif, dayanıklı ve küçük boyutta olmasıdır [7].

Günümüzde birçok farklı endüstri alanında ve çevresel kontrol işlemlerinde analitik tekniklerin geliştirilmesi için artan bir gereklilik mevcuttur. Sensör teknolojisindeki ve elektronikteki ilerleme, yeni malzemelerin sentezlenmesi, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi sayesinde artış göstermektedir. Üreticiler günümüzde çok değişik özelliklere sahip cihazları kullanıma sunmaktadır. Bunlardan birisi gaz takip ve ölçümlerinde kullanılan alarm cihazlarıdır. Bu cihazlar uzun süre kullanılabilir ve standart kalibrasyon kontrolü haricinde özel bir bakım gerektirmezler.

Gazların ve organik buharların algılanabilmesi için çok sayıda farklı kimyasal maddelerle elde edilmiş çok çeşitli sensörler mevcuttur. Bunlardan bazıları optik sensörler, elektro-kimyasal sensörler, akustik sensörler, metal-oksit (katıhal) sensörler, infrared (IR) dedektörler ve ultraviyole (UV) dedektörler olarak sıralanabilir. Bu sistemlerin her birisi gazları algılamak için farklı bir algılama prensibine sahiptir [52].

1962'den beri pek çok araştırmacı toksik kirleticilerin ve yanıcı gazların tespiti üzerine çalışmışlardır. Kalay oksit (SnO_2) ve çinko oksit (ZnO) gibi yarı iletkenler gaz algılama uygulamalarında kullanılmaktadırlar [2].

İnce film gaz sensörünün çalışma prensibi ortamdaki gaz miktarına göre yüzeydeki taşıyıcı elektron miktarının değişmesi ve sonucunda elektriksel direnç değişiminin ölçülmesi ile açıklanmaktadır. Yarı iletken oksit ve çevresindeki oksit ya da redükleyici atmosfer ile kimyasal ya da elektronik etkileşimin sonucu yaratılan

değişimin tespiti şeklindedir. Belirtilen etkileşim sonucunda yarı iletken yüzeyinde elektriksel dirençte değişiklik meydana gelir [2]. Bir başka şekilde açıklanacak olursa gaz algılaması adsorblanan oksijen ile algılanacak gaz arasındaki yüzey reaksiyonudur. Havadan oksijen O_2^- , O^- ve O^{2-} olarak kimyasal olarak adsorblanır, bu adsorbsiyon sonucu yüzeye yakın elektron konsantrasyonunda azalma meydana gelir. Sonuç olarak direnç artar. Yarıiletken oksitler redükleyici gaz ile etkileştiğinde, tane sınırındaki bariyerin yüksekliği azalmakta böylece dirençte azalma meydana gelirken iletkenliğin artmasına neden olur [2]. Yüzeydeki direnç değişiminin hassasiyeti filmin algılama karakteristiklerini belirler. Metal oksit kullanılarak üretilen gaz sensörleri hava ortamında elektrik direncindeki değişimden dolayı oksitleyici ya da yanıcı gazların tespitinde kullanılmaktadır. Basit bir çalışma prensipleri olmasına rağmen hassasiyet, uzun süre kararlılıklarını koruma, sağlamlık ve fiyat gibi önemli özelliklerinin olması nedeniyle mükemmelliklerini kanıtlamışlardır [2]. Bu avantajlara ilave olarak nanoboyutlu malzeme kullanılarak sensörler daha düşük çalışma sıcaklıklarında daha hassas gaz algılama uygulamaları gerçekleştirilerek sensörler daha da mükemmel hale getirilmiştir [2]. Gaz sızıntısı alarmı, yangın alarmı, arabalar için otomatik düzenleyici, hava kalite kontrolü, alkol dedektörü, koku algılayıcı, ozon dedektörü vb. yerlerde çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Diğer açıdan sensörlerin temel prensipleri tam olarak bilim tarafından açıklanamamıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda ayrıntılı sensör dizaynının anlaşılması hedeflenmiştir [2].

Saf metal oksitten yapılmış olan sensör hava ile temas ettiğinde her tanede yüzey boşluk yükü (elektron eksikliği) oluşturacak şekilde oksijen tanelerini yüzeye adsorbe eder. Bu şekilde temas eden taneler arasında çift Schottky bariyerinin oluşumu gerçekleşir. Havaya yanıcı bir gaz (örneğin hidrojen) karıştığında adsorbe olmuş oksijen ile reaksiyona girerek yüzey boşluk yükünü dolayısıyla bariyer yüksekliğini düşürür. Göç ile elektron hareketi için bu cihazın elektriksel direncinde düşmeye neden olur. Açıkta ki adsorblanan oksijen yanıcı gazlar karşısında reseptör (alıcı) gibi davranır, Schottky bariyeri de transistör gibi davranır. Farklı bir reseptör (örneğin PdO) yüzeyde bulunduğu, reseptörün etkisini arttırırken transistör etkisi aynı kalır. Oksijen adsorpsiyonu, redoks veya asit-baz özelliğini içeren yüzey katalitik özellikleri reseptör fonksiyonuna bağlı olarak dizayn faktörleridir, aynı zamanda transduser fonksiyonuna bağlı olarak tane boyutu, latisdeki içsel ve dışsal donörlerin yoğunlukları ve seviyeleri

de dizayn faktörleridir. Adsorblanan oksijen ile reaksiyona girerken yanıcı gaz poroz algılayıcı bünyeye (tanelerin bir araya gelmesi) difüze olur, bu nedenle içeriye girdikçe gaz konsantrasyonu azalır. Bu difüzyon reaksiyon etkisinden dolayı gaz yanıtındaki azalma faktörü hesaba katılmalıdır. Boyutlar ve por dağılımı ve gaz difüzyon yolu (tanelerdeki ikincil partiküllerin çapı yada kalınlığı) bu bağlamda dizayn faktörleri arasındadır [2].

Küçük sensörlerin (küçük hacim, küçük boyut ve düşük güç tüketimi) mikro işleme, ince veya kalın film teknolojileri ile geliştirilmesi araştırmacıların gittikçe artarak ilgisini çeken bir alan olmuştur. Bu gibi sensörlerin uygulamaları çevre kontrolü, süreç kontrolü, ev güvenliği ve kontrolsüz gerçekleşen patlamalarında dahil olduğu pek çok alan için önem taşımaktadır. İlave olarak portatif ve çeşitli sensör modüllerini içeren, büyük alanları kontrol edebilen, küçük sensörlerin mikroelektronik devreler ile entegrasyonunun sağlandığı ve kullanıldığı uygulamalar büyük fayda sağlayacaktır. Belirtilen amaçla çalışmada daha da küçük sensörlerin geliştirilmesi önem kazanmıştır [2].

Kimyasal sensörün gaza karşı etkisi genellikle yüzeydeki algılayıcı film tabakası ile gazın etkileşimine bağlı olduğundan algılayıcı film tabakasının artan yüzey alanı ile sensörün hassasiyet değeri ve tepki hızı gelişecektir. Bununla birlikte sensör özelliklerine nanopartiküllerin boyut dağılımı ve tane sınırları da etki etmektedir. Nanoyapılı malzemelerin bir faydası da malzeme hazırlama ve işlem süreci olarak karşımıza çıkmıştır. Nanoboyutlu ve mikrobayutlu mimarinin çeşitli yöntemlerle eldesi ile daha verimli sensör algılayıcı tabakalarının geliştirilmesi mümkündür.

Elektronik üretim teknolojisindeki hedef devreleri daha küçük, ucuz ve düşük güç ile çalışacak şekilde üretmek ayrıca daha küçük boyuttaki cihazların daha fazla özellik içermesidir. Her ne kadar cihazlardaki film tabakaları mikron boyutunda olsa da nanoteknolojinin kullanılmasıyla bunları oluşturan yapılar nanoboyutta olmaya başlamıştır. Böylece yeni nesil cihazların üretiminde ve özelliklerinde çeşitli avantajlar sağlayacak yeni yöntemlerin daha aktif olarak kullanımı söz konusudur [2,51].

Bir gaz ölçüm sistemi şu ana elemanlardan oluşur; algılayıcı gaz sensörü, elektronik değerlendirme/gösterge/kontrol panosu, sesli/işıkli uyarı düzenekleri ve otomatik gaz kesme vanasından oluşmaktadır [50].

1.6.1. Gaz Sensör Ünitesi

Sistemin en önemli elemanlarından birisidir. Gaz kaçağı oluşturacak bölgeye yerleştirilip gaz kaçağı halinde kendi bünyesinde oluşturduğu fiziksel veya kimyasal (elektrik, optik, manyetik veya yapısal) değişim, elektronik değerlendirme ünitesi tarafından algılanacak şekilde tasarlanmıştır. Burada önemli olan gaz sensör maddesinin tespit edilecek gazlarla etkileşmeye girmesi ve fiziksel veya kimyasal bir değişim göstermesidir. Aksi takdirde gaz tespiti yapılamaz. Ayrıca sensör maddesinin sadece tespit edilmesi gereken gazla etkileşmesi beklenir [50].

1.6.1.1. Elektronik Değerlendirme ve Uyarı Sinyali Gönderme Birimi

Bu ünite gaz sensöründen aldığı bilgiyi sesli veya ışıklı uyarı sistemine iletir ve otomatik gaz kesme işlemini yapar. Basit bir dedektör olarak adlandırabileceğimiz alarm cihazlarında, bu ünite aynı zamanda sensör ve dahili sesli uyarı elemanında içermektedir. Bu dedektörlerin kontrol fonksiyonlu olan tiplerinde, genelde tek seviyede hem harici sesli uyarı çaldırma sistemi, hem de otomatik gaz kesme fonksiyonları için kontak röle çıkışları mevcuttur [50].

1.6.1.2. Sesli Işıklı Uyarı Sistemi

Bu uyarı devresi ışıklı, sesli veya her ikisinin de olabileceği bir sistemdir. Uyarı düzeneğinin hem ışıklı hem de sesli olması tercih edilir. Böylece uyarı elemanının ses veya ışık düzeneğinde oluşabilecek herhangi bir hatada diğeri fonksiyonunu yerine getirebilecektir [50].

1.6.1.3. Otomatik Gaz Kesme Vanası

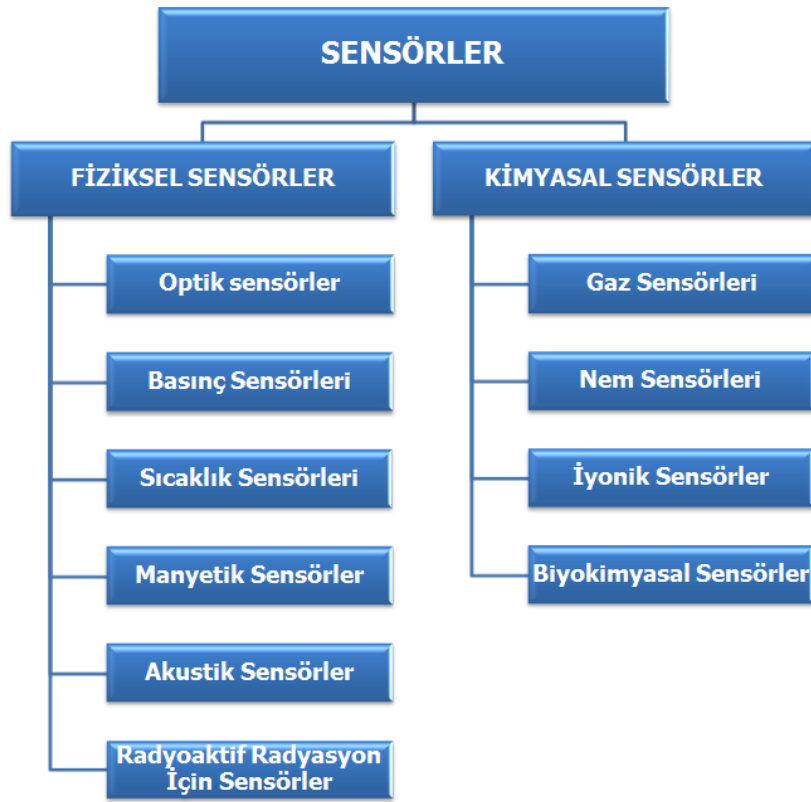
Bunlar solenoid olarak adlandırılan sıvı ve gazların akışını kontrol için kullanılan elektromekanik gaz kesme vanalarıdır. Ancak gaz güvenlik sisteminin bir

parçası olarak kullanılan bu solenoid vananın gaz yolu armatürlerinde kullanılan vanadan farklı olarak elle kurmalı tip olması tavsiye edilir [50].

1.6.2. Sensörlerin Sınıflandırılması

Sensörler sinyalleri dönüştürme prensiplerine, amaçlarına, çıkış sinyallerine, malzeme ve üretim teknolojilerine göre sınıflandırılmaktadır. Şekil 1.14’de görüldüğü gibi çalışma prensiplerine göre fiziksel ve kimyasal sensörler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Fiziksel sensörler piezoelektrik, iyonizasyon, termoelektrik, fotoelektrik gibi fiziksel etkilerle çalışmaktadır. Kimyasal sensörler ise kimyasal adsorbsiyon ve elektrokimyasal reaksiyonlar ile çalışmaktadır. Kimyasal sensörlerin gelişmesi ile birlikte yüksek performanslı cihazların üretimi ve buna bağlı olarak daha düşük enerji ile çalışan cihazlarda artış beklenmektedir.

Her iki sensörde miktarsal olarak en küçük değişimleri ölçer ve elektriksel sinyale dönüştürürler [7].



Şekil 1.14. Çalışma prensiplerine göre sensörlerin sınıflandırılması

Kullanım amaçlarına göre ise sensörler basınç ve kuvvet sensörü, seviye sensörü, hız sensörü, titreşim sensörü, manyetik alan sensörü, sıcaklık sensörü, nem sensörü, biyosensör ve gaz sensörleri olarak sınıflandırılırlar.

Çıkış sinyallerine göre ise analog, dijital ve anahtar sensör olarak sınıflandırılırlar. Ayrıca malzemenin türüne göre metal, seramik, polimer ve kompozit sensörler olarak sınıflandırılır. Bu malzemeler iletken, yalıtkan, dielektrik ve manyetik gibi fiziksel özelliklerine göre de sınıflandırılır. Malzemenin kristal yapısına göre ise tek kristalli, çok kristalli ve amorf olarak sınıflandırılır. Ayrıca üretim teknolojilerine göre entegre edilmiş sensörler, ince film sensörler, kalın film sensörler ve seramik sensörler olarak sınıflandırılır. Entegre edilmiş sensörler silikon esaslı yarıiletken devre üzerinde üretilir. İnce film sensörler dielektrik bir malzeme üzerine uygun ve hassas bir malzemenin uygulanmasıyla üretilir. Kalın film sensörler ise Al_2O_3 gibi seramik bir altlık üzerine uygulanır. Elde edilen film uygun bir sıcaklıkta bir ısıl işleme maruz bırakılır. Bu tür sensörler ve seramik sensörler bilinen seramik teknolojisi ile üretilir [6,7].

Sensör maddesi ile gaz molekülleri arasındaki etkileşmeler sonucu sensör maddesinin fiziksel, kimyasal ve yapısal özelliklerinde meydana gelen değişiklikler gaz ölçüm sisteminin çalışma prensibini oluşturmaktadır. Sensör maddesiyle etkileşimine göre iletkenlik, potansiyel, kapasite, ısı, kütle, optik özellikler, renk değişimi, polimerleşme gibi birçok fiziksel ve kimyasal özellikleri kapsayabilir. Tablo 1.2’de bazı sensör çeşitleri ve ölçtükları özellikler verilmiştir [50].

Tablo 1.2. Sensör çeşitleri ve özellikleri [50].

SENSÖR TİPİ	SENSÖR MADDESİ	FİZİKSEL, KİMYASAL ve YAPISAL DEĞİŞİM
Yarı iletken metal oksit	Yarı iletken metal oksitleri (SNO:GO)	Direnç değişimi
Kuartz kristal mikrobals (QCM) ve yüzey akustik dalga (SAW)	Organik ve inorganik ince film tabakaları	Kütle değişimi sonucu frekansın değişimi
İletken polimerler	Modifiye edilmiş iletken polimerler	Direnç değişimi
Katalitik alan etkili sensörler	Katalitik metaller	Çalışma fonksiyonunun değişimi
Kızılötesi sensörler	IR- yarı iletken maddeler	IR soğurma
Elektrokimyasal hücreler	Katı veya sıvı elektrolitler	Akım-gerilim değişimi

Gaz ölçüm sistemlerinin gelişimlerinin en önemli kaynaklarından biride yarıiletken teknolojisinin gelişimi ve sensör uygulamalarında kullanılmasıdır. Fakat gaz ölçüm sistemlerinde hassaslık, uzun ömürlü olma ve pratik uygulamaya sahip olması gibi özellikler arandığı için çalışmalar daha çok sensör maddesi üretme üzerine yoğunlaşmıştır [50]. Bu sebeple yarıiletken metal oksit sensörleri geliştirilmiş, aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

1.6.2.1. Yarı İletken Esaslı Sensörler

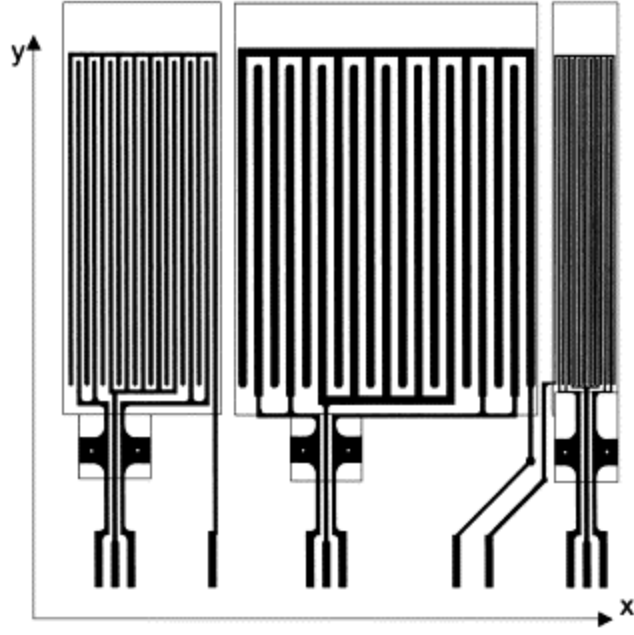
Yarıiletken gaz sensörlerinde sensör maddesi olarak genellikle kalay oksit ve ısıtılmış metal oksit maddeleri kullanılır. Sensör maddesinin elektriksel özelliklerinden yararlanılarak yapılmıştır. Bu sensör maddelerinin zararlı gazlarla etkileşmeleri sonucu dirençlerinde artma veya azalma gözlenerek sensör maddesi hakkında bilgi edinilir. Yarıiletken gaz sensörlerinin gazı algılama biçimi yarıiletken malzeme üzerindeki serbest elektronların gaz molekülleri ile etkileşmesi sonucu olmaktadır. Bu etkileşme yarıiletkenin elektriksel iletkenliğinde bir değişikliğe sebep olur.

Yarıiletken, elektrik akımını yarıiletken maddenin yüzeyi üzerinde bulunan serbest elektronlar sayesinde iletebilmektedir. Yarıiletken sensörün, temiz ortamdaki iletkenlik/geçirgenlik düzeyi ile gaz kaçağı halinde oluşan kirli ortamdaki iletkenlik/geçirgenlik düzeyi arasında oluşan fark, bu tip sensörlerin kaçak tespitinde kullandığı yöntemi oluşturmaktadır. Bu sensörlerin dikkat edilmesi gereken en önemli özelliği, çalışma prensipleri nedeni ile herhangi bir gaza karşı tam seçici olamamalarıdır [50].

1.6.3. Gaz Sensör Çalışmalarında Aralıklı Elektroda Sahip Sensörlerin Kullanılması

En basit halde bir kimyasal gaz sensörü gaz molekülleri ile etkin bir şekilde etkileşecek bir ara yüzey maddesi ile ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı maddenin fiziksel ya da kimyasal özelliklerindeki değişimi ölçülebilir bir sinyale (elektriksel, optik vb.) dönüştürecek bir transduserden oluşur.

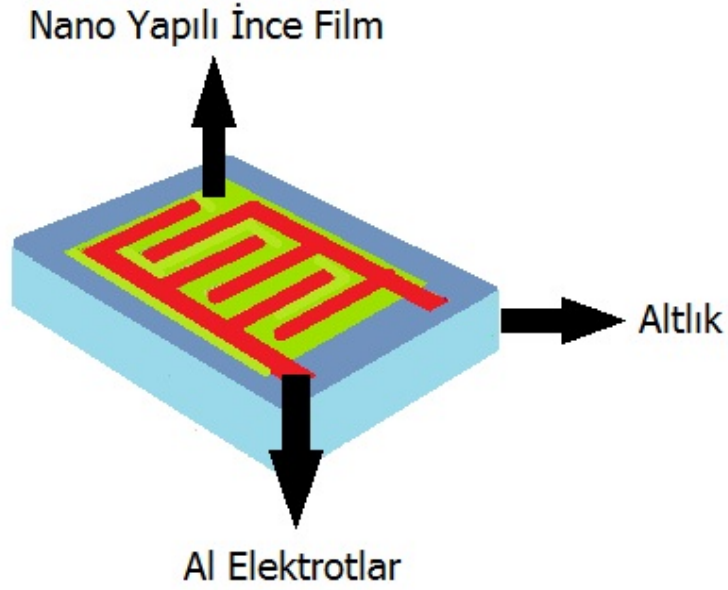
Ara yüzey olarak kullanılan maddenin iletkenliğindeki değişimin ölçülmesi esasına dayanan sensörlerde yaygın olarak kullanılan dönüştürücü tipi aralıklı elektroda sahip sensörlerdir. Bir aralıklı elektroda sahip sensörler iç içe geçmiş parmaklıklardan oluşur (Şekil 1.15) [53]. Aralıklı elektroda sahip sensörlerin kullanıldığı gaz sensörlerinde kullanılan algılayıcı malzemenin iletkenliğinin gaz konsantrasyonuyla değişmesi ve bu değişimin geri dönüşülebilir olması yani, ortamda gaz olmadığı durumda iletkenliğin başlangıç değerine dönmesi gerekir. Aralıklı elektroda sahip sensörlerin gaz molekül/moleküllerinin algılayıcı malzeme tarafından adsorplanması filmin iletkenliğinde bir değişime neden olur. Adsorpsiyon sonucu filmin iletkenliğindeki değişim aralıklı elektroda sahip sensörler vasıtasıyla kolayca ölçülebilir.



Şekil 1.15. Çeşitli aralıklı elektroda sahip sensörlerin yapısı [54].

Ftalosyanin ve oksimler gibi iletkenliğin düşük olduğu malzemelerde iletkenliğin, hassas bir şekilde ölçülebilmesinde elektrotlar arasındaki mesafe ve elektrotların geometrisi kritik bir rol oynar. Elektrotlar arasındaki mesafe en aza, parmaklıkların sayısı ve parmaklıkların üst üste binme uzunluğu maksimuma çıkarılarak ölçülecek iletkenlik değeri büyük oranda yükseltilebilir. Ayrıca bu sayede ölçülebilir bir akım değeri elde edebilmek için uygulanması gereken yüksek gerilimlerin sakıncası ortadan kaldırılabilir.

Bu tez çalışması için ara yüzey olarak kullanılan aralıklı elektroda sahip sensörler şekil 1.16'de verilmiştir.



Şekil 1.16. Deney numunesinin şematik gösterimi

Aralıklı elektroda sahip sensörler kullanarak filmin doğasına ve gaz/gazlara verdiği cevaba bağlı olarak hem yüzey iletkenliği, hem de hacimsel (bulk) iletkenliği ölçülebilir. Filmin hacimsel iletkenliği σ ,

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{I.A}{(V/d)} = \frac{I.d}{V(2n-1)Lh} \quad (1.18)$$

ifadesi ile verilir [53]. Burada J, akım yoğunluğu; E, elektrik alan; I, ölçülen akım; A, elektrotlar arasının kesit alan; V, uygulanan gerilim değeri; d, elektrotlar arasındaki mesafe; L, elektrotların örtüşme uzunluğu; h'da elektrotların kalınlığıdır.

Filmin elektrotlar arasındaki kanalları dolduracak kadar kalın olması durumunda A, elektrotlar arasındaki kanalların sayısının (2n-1) elektrotların örtüşme uzunluğu I ve elektrotların kalınlığı h ile çarpımına eşit olacaktır. Film kalınlığının küçük olması durumunda h film kalınlığı olacaktır. Bu durumda film yüzey iletkenliği σ ,

$$\sigma = \frac{I.d}{(2n-1)VI} \quad (1.19)$$

ile verilir [53]. Film kalınlığının elektrot kalınlığından küçük olması durumunda film kalınlığına bağlı ölçümlere bakarak iletkenliğin yüzey iletkenliğini yoksa bulk iletkenliğini olduğu ayırt edilebilir.

Ortamdaki gaz moleküllerinin film tarafından adsorplanması sonucu filmin iletkenliğindeki değişim direkt olarak adsorplanan gaz moleküllerinin sayısı N ile orantılıdır. Bu durum matematiksel olarak,

$$d\sigma/dN = p(N_0 - N)dt + p'Ndt \quad (1.20)$$

şeklinde ifade edilebilir [53]. Burada N_0 yüzeydeki algılayıcı malzeme moleküllerinin sayısı, p gaz moleküllerinin birim zamanda adsorplanma ihtimali, p' ise birim zamanda gaz moleküllerinin desorpsiyon ihtimalidir. Yukarıdaki ifadeden adsorpsiyon için,

$$\sigma = \sigma_0 \{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (1.21)$$

geri dönüşüm (recovery) için de,

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-t/\tau) \quad (1.22)$$

ifadeleri bulunur [53].

1.6.4. Gaz Sensörleri Uygulama Alanları

Gaz sensörlerinin uygulama alanları Tablo 1.3'de bazı başlıklar altında verilmiştir.

Tablo 1.3. Gaz sensörlerinin uygulama alanları [50].

Çevresel uygulamalar	Hava kirliliği tespiti ve ayrıntılı rapor alınmasında (baca, egzoz gazları), yangın ve güvenlik alarmı, hastahane, ev, laboratuvar vb. yerlerde patlayıcı ve yanıcı gazların tespitinde,
Sağlık uygulamaları	Tıbbi uygulamalar (anestezi ve klinik teşhis), kimyasal ve biyokimyasal analizlerde,
Ticari uygulamalar	Güvenlik ihtiyaçları, kimyasal fabrika ve rafinerilerde işlem kontrolünde, atık gazların ve gaz kaçağının kontrolünde, zararlı gazların veya kimyasalların bulunduğu fabrikalarda veya işyerlerinde çalışma alanları güvenliğinde ve çalışanların sağlığının korunması amacıyla,
Askeri uygulamalar	Askeri alanlarda kimyasal ve zararlı gazlardan korunmak amacıyla,

1.6.5. Algılayıcı Malzeme-Gaz Etkileşimleri

Algılama mekanizmasına bakmaksızın bir akustik dalga sensörün cevap karakteristiği, tayin edilecek gaz molekülleri ile ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı madde arasındaki etkileşmenin doğasına bağlıdır. Bu etkileşmelerin türünün bilinmesi ara yüzey maddesi tasarımı için önemlidir. Algılayıcı madde ile tayin edilecek gaz molekülleri arasındaki etkileşmeler fiziksel ve kimyasal etkileşmeler olmak üzere iki grupta toplanabilir.

Adsorpsiyon durumunda bu etkileşmelere sırasıyla fiziksel adsorpsiyon ve kimyasal adsorpsiyon denir.

Fiziksel adsorpsiyon çok küçük aktivasyon enerjisine sahiptir ve nispeten zayıf olan Van der Waals etkileşmelerini kapsar. Dolayısıyla küçük enerjili bir prosesdir (5-12 kcal/mol, 0.217-0.521 eV). Fiziksel adsorpsiyon genelde oda sıcaklığında geri dönüşümlüdür (reversibledir) fakat seçici değildir.

Kimyasal adsorpsiyon genelde 10 kcal/mol daha fazla enerjilerle, elektron yoğunluğunun yeniden dağılımıyla ve 25-100 kcal/mol (1.086-4.346 eV) ve daha büyük enerjili kimyasal bağların oluşumuyla karakterize edilebilirler. Kimyasal adsorpsiyon durumunda tayin edilecek gaz molekülleri arasındaki kimyasal bağlar bozularak ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı madde ile reaksiyona girebilir ve yeni bağlar

oluşabilir. Böylece ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı madde orijinal özelliğini kaybeder. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon birbirlerinden aşağıdaki özellikler sayesinde ayırt edilebilirler.

1. Fiziksel adsorpsiyon durumunda adsorpsiyon ısı küçük, kimyasal adsorpsiyon durumunda ise büyüktür.
2. Fiziksel adsorpsiyon durumunda adsorplanan moleküller yüzeyden kolayca uzaklaştırılabilir, kimyasal adsorpsiyon durumunda ise bu çok zordur.
3. Fiziksel adsorpsiyon durumunda, uygun sıcaklık ve basınç koşullarında kalınlığı takdirde adsorplanan moleküllerin çapının birkaç katı olan bir adsorplanmış tabaka oluşur. Kimyasal adsorpsiyon durumunda ise monomoleküller bir tabaka oluşturur.

Adsorpsiyon durumunda, adsorplanan madde ile ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı maddenin moleküler seviyede karışması söz konusudur. Adsorpsiyon durumunda adsorplanan moleküller ara yüzey maddesi içerisinde çözünürler. Diğer bir deyişle adsorpsiyon etkileşimleri adsorpsiyonda olduğu gibi sadece yüzeydeki aktif adsorpsiyon merkezleri ile sınırlı değildir.

Denge durumunda soğurulmuş madde miktarına o maddenin çözünürlüğü denir. Ara yüzey olarak kullanılan maddenin bir polimer olması durumunda, difüz eden maddenin çözünürlüğü polimerdeki zincirler arasındaki ve zincir-difüze olan madde arasındaki etkileşimlerle belirlenir [53].

1.6.6. Bir Gaz Sensörde Bulunması Gereken Özellikler

1.6.6.1. Seçicilik

Bulunması gereken en önemli özelliklerin başında gelir. Eğer sensörün seçiciliği çok iyi değilse ek işlemler yapılması gerekeceğinden seçicilik sensörlerde daha fazla önem arz eder. Sensörün seçiciliği bir spesifik bileşene duyarlılığıyla ölçülür [55].

1.6.6.2. Tekrarlanabilirlik

İdeal bir gaz sensöründe aynı koşullar altında ard arda yapılan ölçümlerde aşağı yukarı aynı sonuçları göstermesi istenir. Bir gaz sensörün çalışması yapılırken mutlaka tekrarlanabilirliğinin ölçülmesi gerekmektedir. Eğer tekrarlanabilirlik ne kadar fazla ise sensörün o denli iyi olduğu söylenebilir [55].

1.6.6.3. Kararlılık

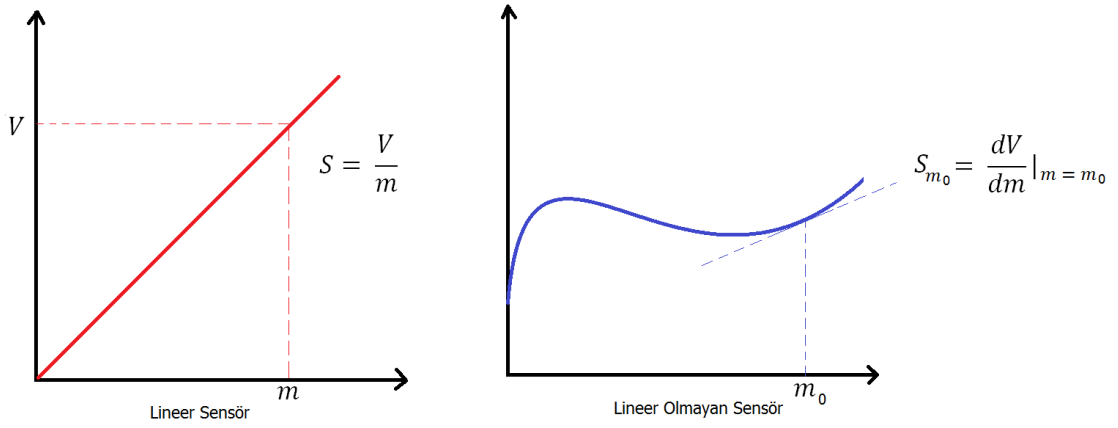
Kararlılık kullanılan materyalin fiziksel dayanıklılığına bağlıdır. Ayrıca pH, nem, ortam, ısı, O₂ derişimi gibi etkenlerde kararlılığı etkilemektedir. Kararlılığın yüksek olması sensörün ideal gaz sensör olması için gereklidir [55].

1.6.6.4. Kalibrasyon Gereksinimi

Normalde bir sensörün ideal olması için ya hiç ya da en çok bir kere kalibrasyona ihtiyaç duyması istenir. Fakat teorikteki bu olay pratikte pek mümkün olmamıştır. Kullanımları boyunca gaz sensörler sık sık kalibre edilmektedir [55].

1.6.6.5. Geniş Ölçüm Aralığı

Ölçüm aralığı olarak adlandırılan bölge gaz sensörden alınan akım derişim eğrilerinin lineer olduğu derişim aralığıdır [55]. Sensörlerin ölçüm aralıkları şekil 1.17’de verilmektedir.



Şekil 1.17. Sensörlerin ölçüm aralığı [55].

1.6.6.6. Hızlı Cevap Zamanı

Sensörün cevap zamanı elde edilen eğrilerden anlaşılabilir. Örneğin elde edilen eğride basamakların şekli yayvan ve geniş ise cevap zamanı uzun (yavaş), tersi söz konusu ise cevap zamanı kısa (hızlı)'dır [55].

1.6.6.7. Hızlı Geriye Dönme Zamanı

İlk ölçümü takip edecek ikinci ölçümün ne kadar zaman sonra yapılabileceğini gösterir. Yani ilk ölçümün ardından sabit bir değer gözlemlendikten sonra ikinci ölçüm de aynı süre içinde ilave edilmelidir [55].

1.6.6.8. Kullanım Ömrü

Bir gaz sensörün ömrü; sıcaklık, nem, toz ve yüksek gaz konsantrasyonu gibi faktörlerden etkilenir. Normal çalışma şartları altında, sensörler en az bir yıl, çoğu durumda ise iki yıl dayanır. Yüksek gaz konsantrasyonuna maruz bırakılırsa, sensörün performansı kısalmır. Ayrıca sensörün ömrü gaz sensörün kalibrasyon sıklığı, kararlılık, tekrarlanabilirlik gibi diğer parametrelerini de etkilemektedir [55].

1.6.6.9. Basit ve Ucuzluk

Tasarımı basit ve ucuz, kullanımı rahat olan gaz sensörler ideal gaz sensörlerdir. Son yıllarda yapılan çalışmalarla gaz sensörde bu uygunluğu yakalamıştır [55].

1.6.6.10. Minyatürizasyon ve Sterilize Edilebilirlik

Sensörlerin sterilize edilmesi ve boyutlarının küçültülmesi sensör tasarımında önemlidir. Buna karşın; sensör yapısına giren materyalin fiziksel dayanıklılığı, sterilizasyonu kısıtlayan en önemli parametredir [55].

1.6.6.11. Yüksek Duyarlılık

Sensörlere tutunmuş olan materyalin yalnız belirli maddelere karşı duyarlı olması ideal sensör özelliklerindedir. Tüm bu özellikleri sağlayan ve girişimlerin olmadığı bir sensörün yapılması oldukça zordur. Ancak, bu özelliklerin bazılarını sağlayan sensörler elde edilebilmektedir [55].

1.6.6.12. Tayin Sınırı

Tasarlanan bir sensörün tayin sınırının belirli bir derişim değerin altında olması gerekmektedir. Belirtilen bu sınır, sensör yüzeyinin büyüklüğü, materyalin tayin edilecek maddeye ilgisi, tutulan madde miktarı gibi faktörlerden etkilenir [55].

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Al, Cu ve Sn katkı ZnO numuneler sol-jel metodu ile üretilmişlerdir. Hazırlanan malzemelerin hazırlama aşamaları Şekil 2.1’de verilmiştir.

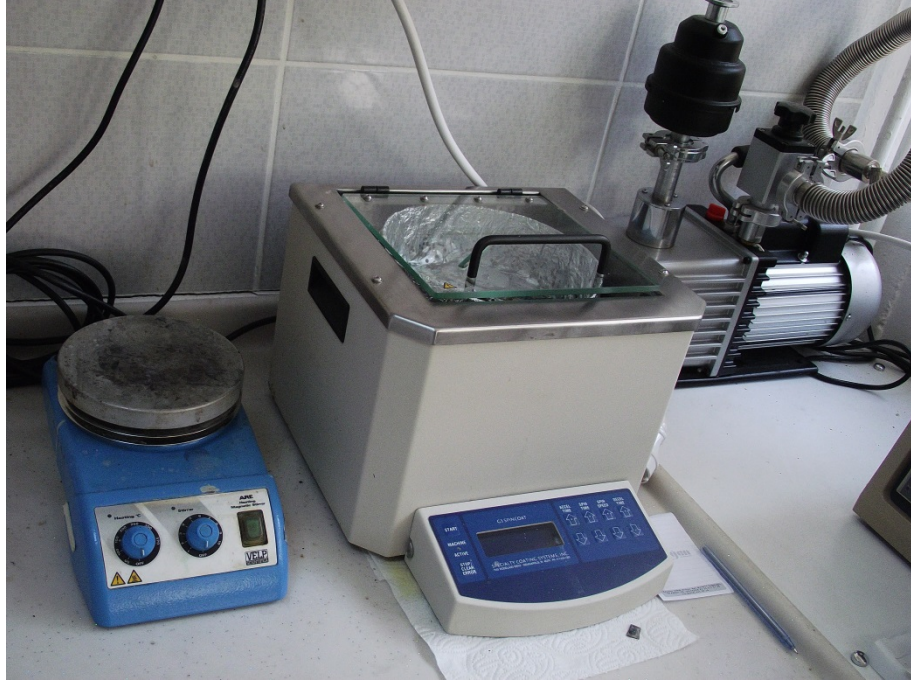


Şekil 2.1. Deney akım şeması

2.1. İnce Filmlerin Büyütülmesi

Katkısız ve katkılı ZnO kullanılarak sol-jel yöntemi ile elde edilen jellerin mikroskop camı üzerine kaplanması döndürme yöntemiyle yapıldı.

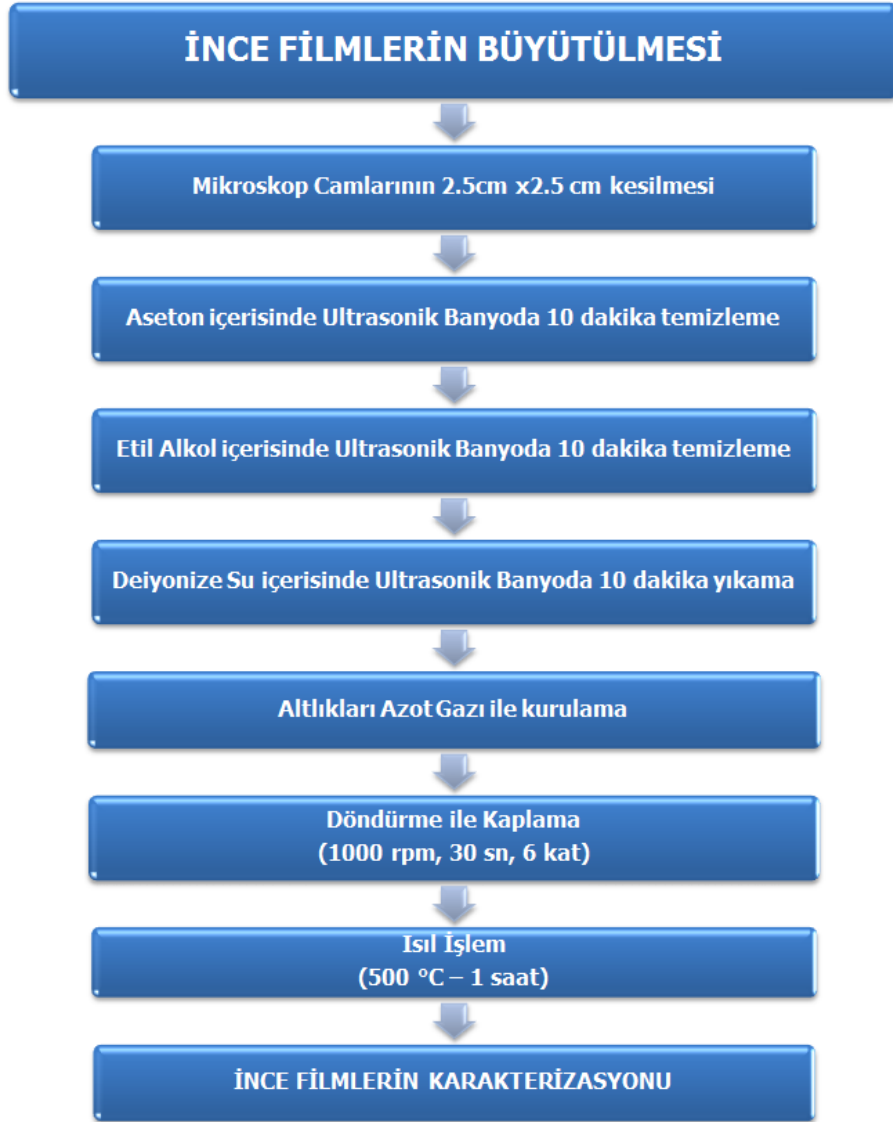
Öncelikle altlık olarak kullanılacak camlar kimyasal yöntemle temizlendi. 2,5 cm x 2,5 cm boyutunda kesilen camlar büyük bir beher içerisine alındı ve beherin içerisine yaklaşık olarak 50 ml civarında öncelikli olarak aseton koyularak 10 dakika ultrasonik karıştırıcıda temizlenmesi sağlandı. Ardından yine aynı miktarda etil alkol koyularak 10 dakika ultrasonik karıştırıcıda ikinci temizleme işlemi yapıldı. Son olarak eşit miktarda de-iyonize su ile 10 dakika ultrasonik karıştırıcıda yıkama işlemi yapılarak camlar temizlendi. Bu kimyasal temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra her bir altlık azot gazı ile tamamen kurutuldu.



Şekil 2.2. İnce filmlerin büyütüldüğü döndürme ile kaplama cihazı

Temizlenen camlar Şekil 2.2’de görülen döndürme ile kaplama cihazı üzerine yerleştirildi. Homojen bir film oluşturmak için cam yüzeyine eşit şekilde çözeltiler dağıtıldı. Kaplama işlemi 1000 rpm hızda ve 30 saniye sürede yapıldı. Ayarlanan süredeki dönme işlemi bittikten sonra önceden 150 °C ayarlanmış ısıtıcı üzerine

kurutulmak üzere filmler konularak 10 dakika bekletildi. Daha sonra aynı işlemler tekrarlandı. Tekrarlama işlemi 6 kat olana kadar devam etti. Tüm numuneler için aynı şartlarda filmler yapıldı. Katı halde elde edilen filmler 500°C’de 1 saat ısıl işleme tabi tutuldu. Altlık üzerine büyütülen ince filmlerin karakterizasyonu yapıldı. İnce filmlerin büyütülmesi sürecinin şematik gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.3. Film oluşturma

2.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri

Filmlerin kristal yapıları X-ışını difraksiyon analizi ile yapıldı. Elde edilen X-ışını difraksiyon desenlerinin piklerin şiddetlerine ve yarı pik genişliklerine bakılarak malzemenin kristalleşmesi hakkında bilgi edinilmiştir. İyi bir kristalleşme seviyesine sahip malzemenin X-ışını kırınım spektrumu, şiddeti minimum olan bir zemin üzerinde bulunan yüksek şiddetli ve yarı pik genişlikleri dar olan piklere sahiptir. Eğer yarı pik genişlikleri geniş ve pik şiddetleri düşük ise kristalleşme seviyesinin iyi olmadığı söylenebilir. Spektrum üzerinde background şiddetinin yüksek olması düşük şiddete sahip pikleri görüntülemeyecek hale getirir. Numunelerin kırınım spektrumları incelendiğinde pik şiddetleri ve genişlikleri arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada elde edilen numunelerin X-ışını kırınım spektrumları kullanılarak malzemelerin kristal yapıları belirlendi.

Kırınım desenlerindeki piklere ait kristal düzlemleri hesaplanıp şekiller üzerinde belirtilmiştir. Hesaplanan düzlemlerin, hegzagonal wurtzite yapıya sahip olan ZnO' ya ait referans değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür [56]. Hegzagonal yapıdaki çinko oksite ait h,k,l indisleri yardımıyla örgü sabitleri olan a ve c değerleri,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.1)$$

denklemini yardımıyla bulunabilir [42,44].

Pek çok katı malzemenin mikro yapıları, birçok taneden meydana gelir. Tane, içerisinde atom dizilimlerinin özdeş olduğu malzemenin bir kısmıdır. Buna karşın atomların yönelimi veya kristal yapı, her komşu tane için farklıdır. Tanelerin büyüklüklerinin ve yönelimlerinin; malzemenin elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Tane sınırları, aynı kristal yapı içinde fakat değişik doğrultulardaki kristal bölgeleri birbirinden ayıran ve atomların düzgün yerleşmediği yüzeysel kusurlardır. Tane boyutunun küçülmesi tane sayısının ve tane sınırlarının artmasına sebep olur. Bu durumda, herhangi bir çizgisel kusur, bir tane sınırı ile karşılaşmadan önce kısa bir mesafe hareket eder. Böylece malzemenin sertliği ve dayanımı artar.

Polikristal yapılar birden fazla faz içerebilir. Bu durumda polikristal yapının özelliği doğal olarak her fazın tek başına sahip olduğu özelliğe ve bu fazların polikristal yapı içinde bulunuş şekline bağlı olacaktır. Her fazın tanelerinin boyutu, mükemmelliği ve yönü diğer fazlardaki tanelerinkinden farklıdır.

Ticari metallerde ve alaşımlarda karşılaşılan tane büyüklükleri 10^{-1} - 10^{-4} cm aralığındadır. Bu sınırlar oldukça uç değerleri gösterir. Tipik değerler ise 10^{-2} - 10^{-3} cm aralığında kalırlar. Kristal tanelerinden birinin boyutu 10^{-5} cm den daha küçük olursa, genellikle tanecik (grain) terimi kullanılır [14]. X-ışını kırınımı sonuçları kullanılarak numunelerin kristal büyüklükleri, Debye Scherrer denklemi olarak bilinen

$$D = \frac{0.9 \lambda}{FWHM \cdot \cos \theta} \quad (2.2)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplandı. Burada D, kristal büyüklüğü; FWHM, maksimum şiddetli pikin yarı pik genişliği; θ , Bragg açısı ve λ , kırınımında kullanılan ışının dalga boyudur [15,56,57]. Numuneler için bulunan kristal büyüklükler Tablo 2.7, 2.14, 2.21'de verilmiştir.

Üretilen numunelerin X-ışını kırınım spektrumları Bruker marka D8 Advance model X-ışınları kırınım cihazında 1,5406 Å dalga boylu $\text{CuK}\alpha$ ışını kullanılarak $30^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ sınır değerlerinde incelenmiştir.

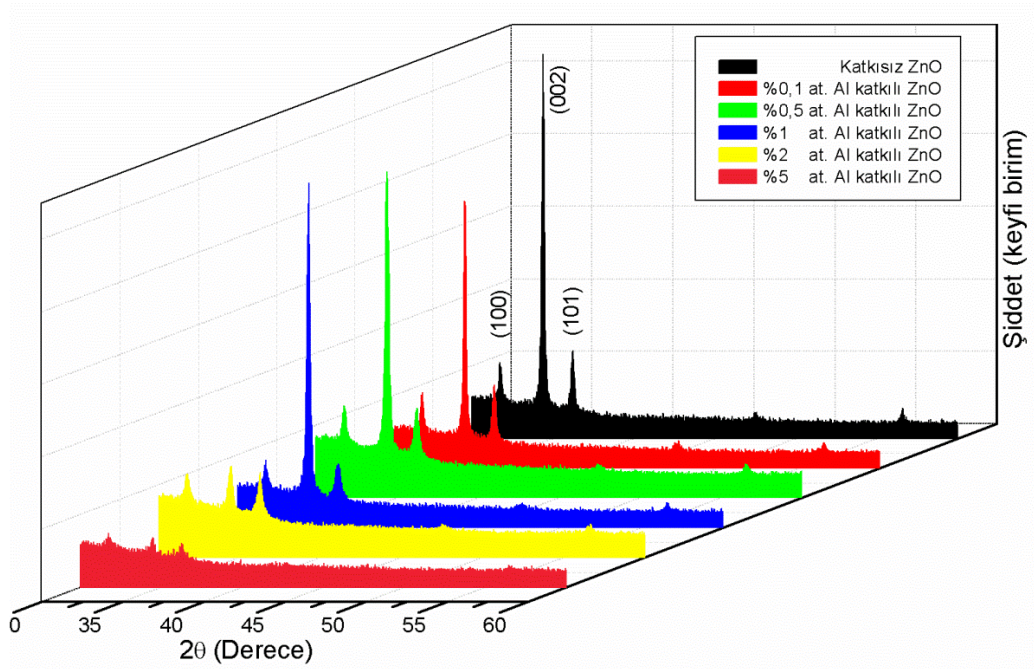


Şekil 2.4. X-ışını kırınım spektrumlarının elde edildiği XRD cihazı

Numunelerin kırınım spektrumları incelendiğinde pik şiddetleri ve genişlikleri arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Şiddetleri büyük ve genişlikleri dar olan piklerde kristalleşme iyi, şiddetleri küçük ve genişlikleri büyük olan piklerde kristalleşmenin iyi olmadığı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada elde edilen numunelerin X-ışını kırınım spektrumlarında, piklerin üzerinde ilgili düzlemlerin Miller indisleri belirtilmiştir. Elde edilen piklerin sonuçları JCPDS (1314-13-2) kartı ile desteklenmiştir.

X-ışını kırınım deseninden ZnO numunesinin hegzagonal yapıda olduğu belirlenmiş olup, ZnO bileşiğine ait pikler tespit edilmiştir.

Her numunenin kristal özelliklerine ait 2θ açıları, pik şiddetleri, kristal yapıları, düzlemlerin miller indisleri ve düzlemler arası mesafelerine ait değerler tablolarda verilmiştir.



Şekil 2.5. Tüm Al katkılı ZnO numunelerinin 3 boyutlu X-ışını kırınım desenleri

Katkısız ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.5’de görülmektedir. Bu pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Tablo 2.1. Katkısız ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,753	1045	Hegzagonal	1	0	0	2,81579
34,811	5302	Hegzagonal	0	0	2	2,60524
36,22	1195	Hegzagonal	1	0	1	2,47807

% 0,1at. Al katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.5’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak

en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.2. % 0,1at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,744	975	Hegzagonal	1	0	0	2,81657
34,811	3640	Hegzagonal	0	0	2	2,60540
36,225	1152	Hegzagonal	1	0	1	2,47777

% 0,5at. Al katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.5' de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)'dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı, % 0,1at. Al katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile hem de % 0,1at. Al katkılı ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.3. % 0,5at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,741	842	Hegzagonal	1	0	0	2,81685
34,889	3309	Hegzagonal	0	0	2	2,60499
36,216	829	Hegzagonal	1	0	1	2,47835

% 1at. Al katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.5’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı, % 0,5at. Al katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin arttığı, yarı pik genişliğinin ise azaldığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı, % 0,5at. Al katkılı ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında ise kristal boyutunun arttığı görülmüştür.

Tablo 2.4. % 1at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,754	870	Hegzagonal	1	0	0	2,81570
34,909	4466	Hegzagonal	0	0	2	2,60613
36,232	870	Hegzagonal	1	0	1	2,47728

% 2at. Al katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.5’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı, % 1at. Al katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında hem de % 1at. Al katkılı ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında da kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.5. % 2at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,722	766	Hegzagonal	1	0	0	2,81848
34,811	876	Hegzagonal	0	0	2	2,60619
36,2	752	Hegzagonal	1	0	1	2,47943

% 5at. Al katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.5’de görülmektedir. ZnO bileşimine ait pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (100) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin de arttığı, % 2at. Al katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise azaldığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı, % 2at. Al katkılı ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında da kristal boyutunun arttığı görülmüştür.

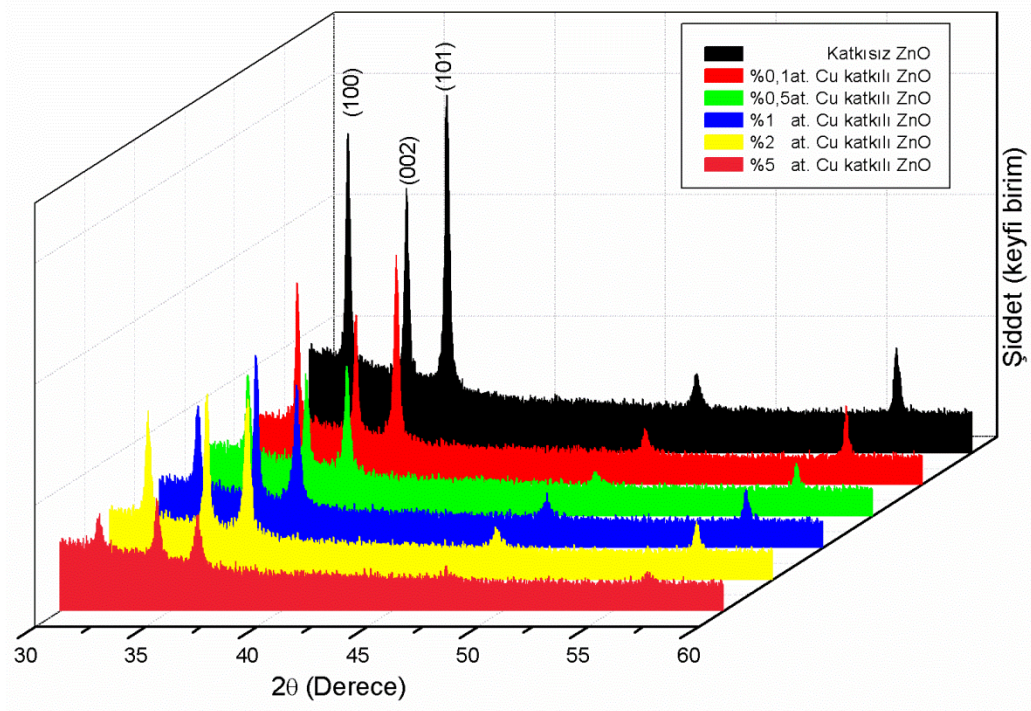
Tablo 2.6. % 5at. Al katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
32,221	693	Hegzagonal	1	0	0	2,81664
34,42	598	Hegzagonal	0	0	2	2,60347
36,223	600	Hegzagonal	1	0	1	2,47794

Al katkılı ZnO için hesaplanan kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri aşağıdaki tablo 2.7’de verilmiştir. Bu değerler literatürle uyum içerisindedir [25]. Tablo 2.7 incelendiğinde Al katkısı ile örgü sabitlerinde ve yarı pik genişliklerinde bir değişimin söz konusu olduğu görülmüştür. Yarı pik genişliğinin değişmesine bağlı olarak kristal boyutu da değişmiştir. Al katkısının genel olarak kristal büyüklüğünü azalttığı tespit edilmiştir.

Tablo 2.7. Al katkılı ZnO numuneleri için kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri

Numune	FWHM	D(nm)	a(Å)	c(Å)
Katkısız ZnO	0,212	41,03	3,25139	5,21048
% 0,1at. Al katkılı ZnO	0,213	40,84	3,25229	5,2108
% 0,5at. Al katkılı ZnO	0,246	35,37	3,25261	5,20998
% 1at. Al katkılı ZnO	0,244	35,66	3,25129	5,21226
% 2at. Al katkılı ZnO	0,288	30,20	3,25450	5,21238
% 5at. Al katkılı ZnO	0,268	32,24	3,25237	5,20694



Şekil 2.6. Tüm Cu katkılı ZnO numunelerinin 3 boyutlu X-ışını kırınım desenleri

Katkısız ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.6'da görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)'dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (101) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Tablo 2.8. Katkısız ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,738	1935	Hegzagonal	1	0	0	2,81709
34,395	1647	Hegzagonal	0	0	2	2,60527
36,682	2222	Hegzagonal	1	0	1	2,47760

% 0,1at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.6'da görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002) ve (101)'dir. Bu

numunedeki kristal atomları (100), (002), (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (101) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002) ve (101)düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.9. % 0,1at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,721	1666	Hegzagonal	1	0	0	2,81859
34,381	1399	Hegzagonal	0	0	2	2,60632
36,837	1891	Hegzagonal	1	0	1	2,47951

% 0,5at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.6'da görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)'dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (101) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002) ve (101)düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı, % 0,1at. Cu katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile hem de % 0,1at. Cu katkılı ZnO numunesi kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.10. % 0,5at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,736	1164	Hegzagonal	1	0	0	2,81726
34,395	1121	Hegzagonal	0	0	2	2,60533
36,720	1140	Hegzagonal	1	0	1	2,47755

% 1at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.6'da görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)'dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin arttığı, % 0,5at. Cu katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) düzlemi için pik şiddeti azalmış, (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin ise arttığı, yarı pik genişliğinin ise azaldığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı, % 0,5at. Cu katkılı ZnO numunesi ile kıyaslandığında da kristal boyutunun arttığı görülmüştür.

Tablo 2.11. % 1at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,721	1138	Hegzagonal	1	0	0	2,81855
34,811	1510	Hegzagonal	0	0	2	2,60683
36,199	1343	Hegzagonal	1	0	1	2,47952

% 2at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.6'da görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)'dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak

en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı, % 1at. Cu katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin arttığı, yarı pik genişliğinin de arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile hem de % 1at. Cu katkılı ZnO numunesi ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.12. % 2at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,733	1391	Hegzagonal	1	0	0	2,81754
34,770	1513	Hegzagonal	0	0	2	2,60685
36,215	1410	Hegzagonal	1	0	1	2,47843

% 5at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.6'da görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)'dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı, % 2at. Cu katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin ise arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile hem de % 1at. Cu katkılı ZnO numunesi kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

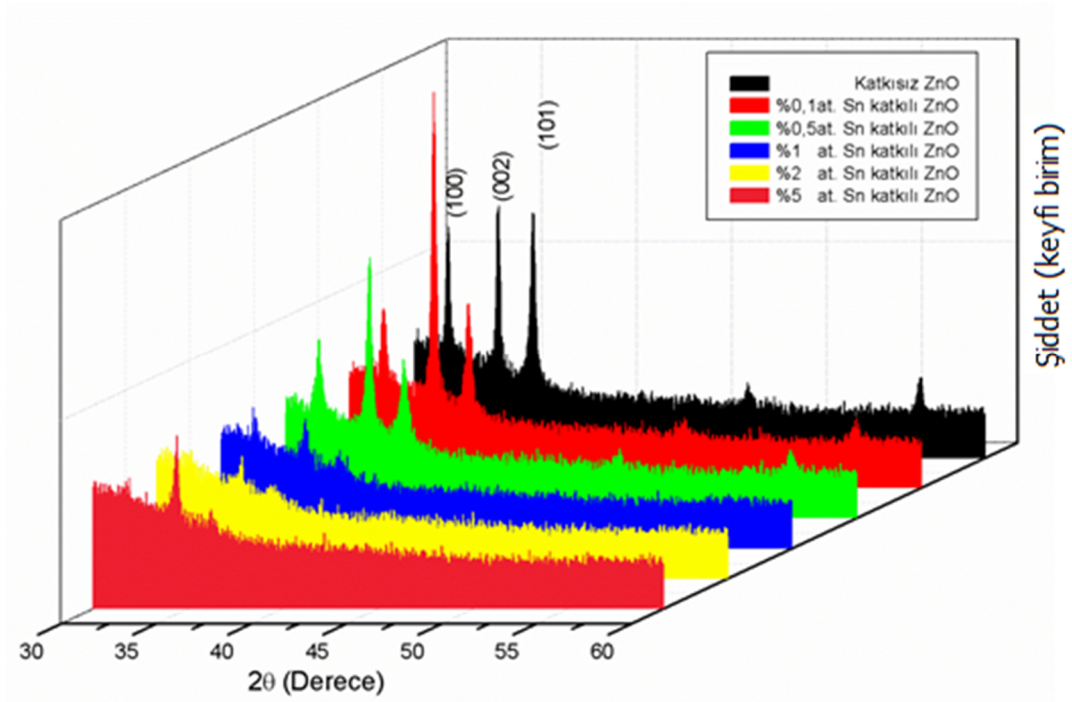
Tablo 2.13. % 5at. Cu katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,759	747	Hegzagonal	1	0	0	2,81525
34,870	900	Hegzagonal	0	0	2	2,60546
36,225	728	Hegzagonal	1	0	1	2,47776

Cu katkılı ZnO için hesaplanan kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri aşağıdaki tablo 2.14'de verilmiştir. Bu değerler literatürle uyum içerisindedir [25]. Tablo 2.14 incelendiğinde Cu katkısı ile örgü sabitlerinde ve yarı pik genişliklerinde bir değişimin söz konusu olduğu görülmüştür. Yarı pik genişliğinin değişmesine bağlı olarak kristal boyutu da değişmiştir. Cu katkısının genel olarak kristal büyüklüğünü azalttığı dikkati çekmiştir.

Tablo 2.14. Cu katkılı ZnO numuneleri için kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri

Numune	FWHM	D(nm)	a(Å)	c(Å)
Katkısız ZnO	0,236	37,05	3,25289	5,21054
% 0,1at. Cu katkılı ZnO	0,266	32,89	3,25462	5,21264
% 0,5at. Cu katkılı ZnO	0,284	30,79	3,25309	5,21066
% 1at. Cu katkılı ZnO	0,253	34,38	3,25458	5,21366
% 2at. Cu katkılı ZnO	0,263	33,07	3,25341	5,2137
% 5at. Cu katkılı ZnO	0,290	30	3,25077	5,21092



Şekil 2.7. Tüm Sn katkılı ZnO numunelerinin 3 boyutlu X-ışını kırınım desenleri

Katkısız ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.7’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Tablo 2.15. Katkısız ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,753	1083	Hegzagonal	1	0	0	2,81582
34,792	1219	Hegzagonal	0	0	2	2,60572
36,233	1216	Hegzagonal	1	0	1	2,47728

% 0,1at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.7’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) ve (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, (002) düzleminde ise arttığı, yarı pik genişliğinin de arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.16. % 0,1at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,765	839	Hegzagonal	1	0	0	2,81475
34,909	1910	Hegzagonal	0	0	2	2,60600
36,233	867	Hegzagonal	1	0	1	2,47726

% 0,5at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.7’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, (002) düzleminde ise arttığı, yarı pik genişliğinin de arttığı, % 0,1at. Sn katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) düzlemi için arttığı, (002) ve (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin ise azaldığı, yarı pik genişliğinin ise azaldığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile hem de % 0,1at. Sn katkılı ZnO numunesi kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.17. % 0,5at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,758	873	Hegzagonal	1	0	0	2,81536
34,850	1232	Hegzagonal	0	0	2	2,60669
36,218	707	Hegzagonal	1	0	1	2,47823

% 1at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.7’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (100) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) ve (002) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin de arttığı, % 0,5at. Sn katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) ve (002) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin ise azaldığı, yarı pik genişliğinin de azaldığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, katkısız ZnO tanecikleri ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı, % 0,5at. Sn katkılı ZnO numunesi ile kıyaslandığında da arttığı görülmüştür.

Tablo 2.18. % 1at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
32,221	642	Hegzagonal	1	0	0	2,82005
34,368	614	Hegzagonal	0	0	2	2,60725

% 2at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.7’de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002)’dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (100) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) ve (002) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin de azaldığı, % 1at.

Sn katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) ve (002) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin ise azaldığı, yarı pik genişliğinin azaldığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile hem de % 1at. Sn katkılı ZnO numunesi kıyaslandığında kristal boyutunun arttığı görülmüştür.

Tablo 2.19. % 2at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
34,714	497	Hegzagonal	1	0	0	2,60497
36,019	458	Hegzagonal	0	0	2	2,49147

% 5at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numuneye ait X-ışını kırınım deseni şekil 2.7'de görülmektedir. ZnO bileşiğine ait pikler (100), (002), (101)'dir. Bu numunedeki kristal atomları (100), (002) (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır.

Burada elde edilen pikler katkısız ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100), (002) ve (101) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin azaldığı, yarı pik genişliğinin arttığı, % 2at. Sn katkılı ZnO numunesi ile karşılaştırıldığında (100) ve (002) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin ise arttığı, yarı pik genişliğinin de arttığı görülmüştür. Kristal büyüklükleri incelendiğinde, hem katkısız ZnO tanecikleri ile hem de % 2at. Sn katkılı ZnO numunesi ile kıyaslandığında kristal boyutunun azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.20. % 5at. Sn katkılı ZnO yarıiletken numunesinin kristal özellikleri

2θ (°)	Pik Şiddeti (Sayım)	Kristal yapısı	h	k	l	d(Å)
31,708	598	Hegzagonal	1	0	0	2,81970
34,753	854	Hegzagonal	0	0	2	2,60495
36,232	436	Hegzagonal	1	0	1	2,47733

Sn katkılı ZnO için hesaplanan kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri aşağıdaki tablo 2.21’de verilmiştir. Bu değerler literatürle uyum içerisinde [25]. Tablo 2.21 incelendiğinde Sn katkısı ile örgü sabitlerinde ve yarı pik genişliklerinde bir değişimin söz konusu olduğu görülmüştür. Yarı pik genişliğinin değişmesine bağlı olarak kristal boyutu da değişmiştir. Sn katkısının genel olarak kristal büyüklüğünü azalttığı fakat % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinde neredeyse kristal büyüklüğünün iki katına çıktığı görülmüştür.

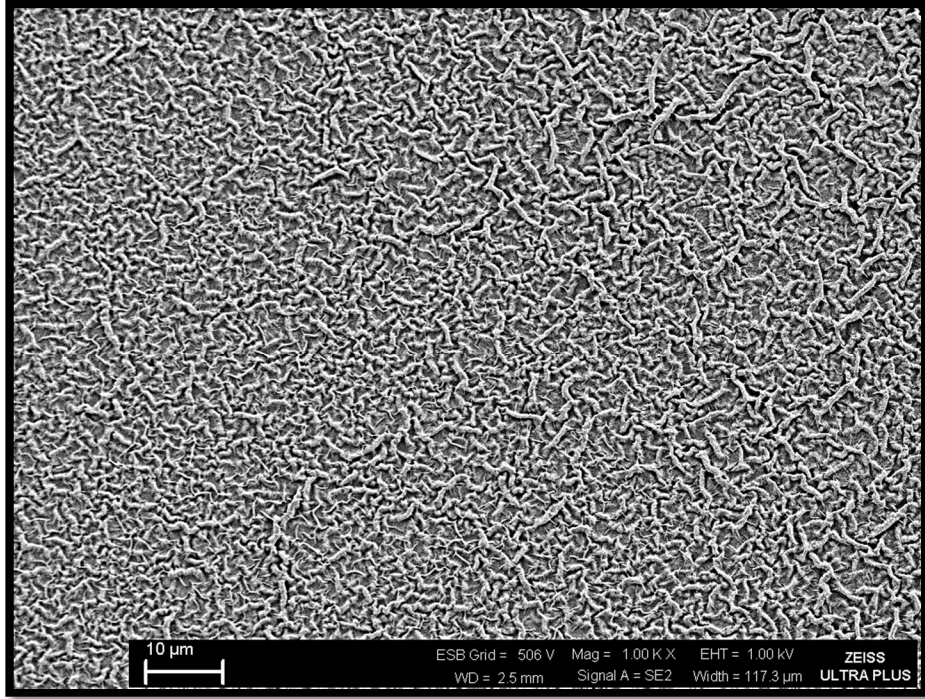
Tablo 2.21. Sn katkılı ZnO numuneleri için kristal büyüklükleri ve örgü sabitleri

Numune	FWHM	D(nm)	a(Å)	c(Å)
Katkısız ZnO	0,238	36,55	3,25142	5,21144
% 0,1at. Sn katkılı ZnO	0,270	32,22	3,25019	5,212
% 0,5at. Sn katkılı ZnO	0,269	32,04	3,25089	5,21338
% 1at. Sn katkılı ZnO	0,252	34,51	3,25631	5,2145
% 2at. Sn katkılı ZnO	0,124	70,13	3,00796	4,98294
% 5at. Sn katkılı ZnO	0,243	35,79	3,66132	5,2099

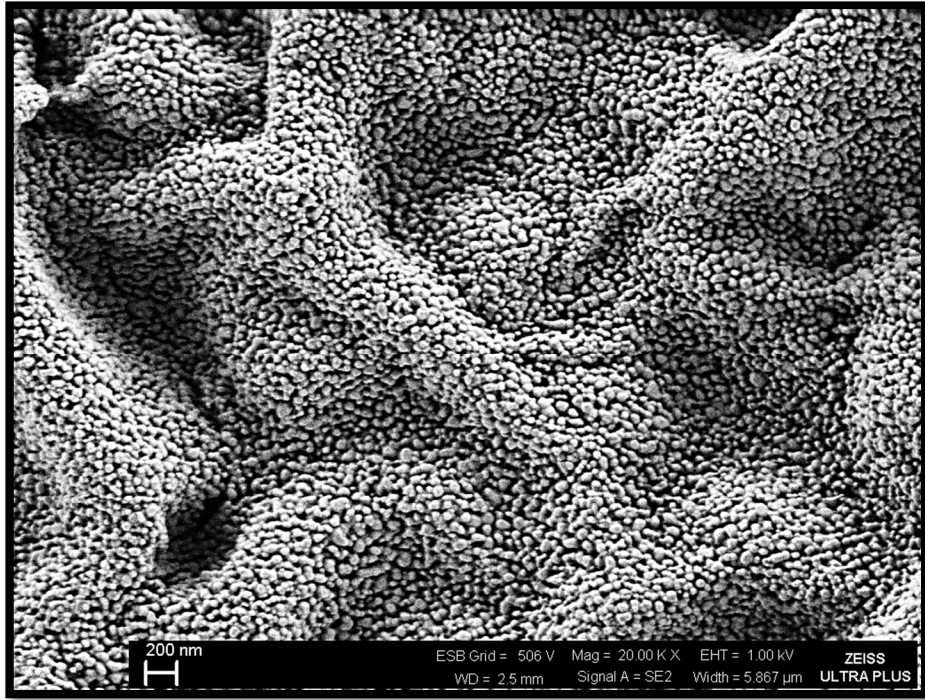
2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

Hazırlanan katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerin yüzey morfolojisini incelemek için filmlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları alınmış ve alınan SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. Tüm numunelerin yüzey yapısı farklı boyut ve morfolojilere sahip tanelerden oluşmaktadır. Katkısız ve Al, Cu ve Sn katkılı ZnO ince filmlerin ortalama tane büyüklükleri hesaplanmış ve katkıyla tane büyüklüklerinin değiştiği görülmüştür. Filmlerin yüzey pürüzlülüğüne dikkat edildiğinde, filmlerin pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu, boşluk ve çatlaklara rastlandığı görülmüştür. Bu çatlakların büyütme işlemi sırasında üretim parametrelerine bağlı olarak oluştuğu düşünülmektedir.

Şekil 2.8 ile şekil 2.13 arasında verilen Al katkıli ZnO filmleri için SEM görüntüleri incelendiğinde katkısiz ZnO için tane büyüklükleri ve fiberlerin daha belirgin olduğu, artan katkıyla fiberlerin neredeyse kaybolduğu ancak % 1at. Al katkısiyla yeniden belirginleşmeye başladığı görülmektedir. Farklı katkı miktarlarında aynı büyütme oranına sahip (2.000X) Al katkıli ZnO filmleri incelendiğinde katkısiz ve % 0,1at. Al katkıli ZnO filmlerinde homojen bir yüzey ve bu yüzeyi oluşturan fiberler açıkça görülmektedir. % 0,5at. Al katkıli ZnO için fiberlerin boyutunun oldukça azaldığı ve tane boyutunun ise buna bağlı olarak küçüldüğü söylenebilir. Ayrıca % 0,5at. Al katkıli ZnO ince filmi için yüzey pürüzlülüğünün de azaldığı görülmektedir. % 1at. Al katkıli ZnO filminde ise fiberlerin küçük çapta yeniden oluşmaya başladığı, % 2at. Al katkıli ZnO filminde ise ince fiberlerin giderek kalınlaşıp belirginleşmeye başladığı farkedilmiştir. % 5at. Al katkıli ZnO için ise fiberler belirgin hale gelmiştir.

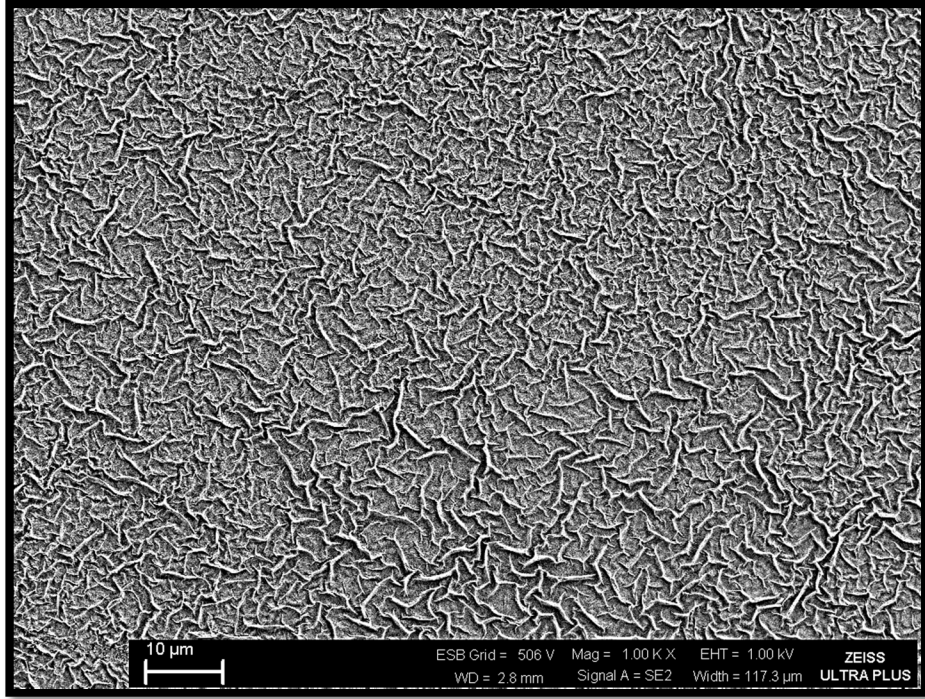


a)

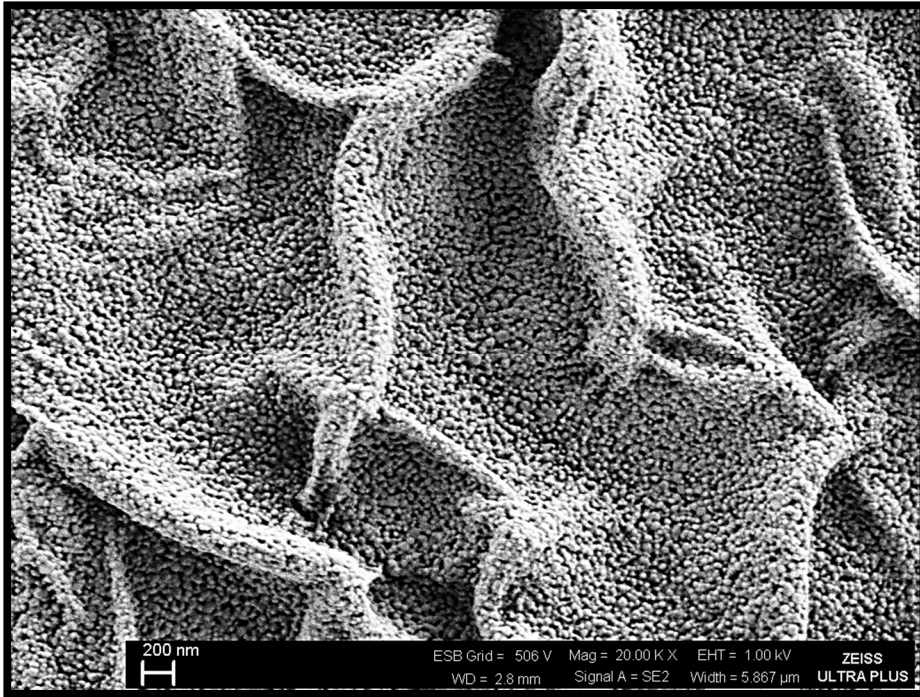


b)

Şekil 2.8. Katkısız ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

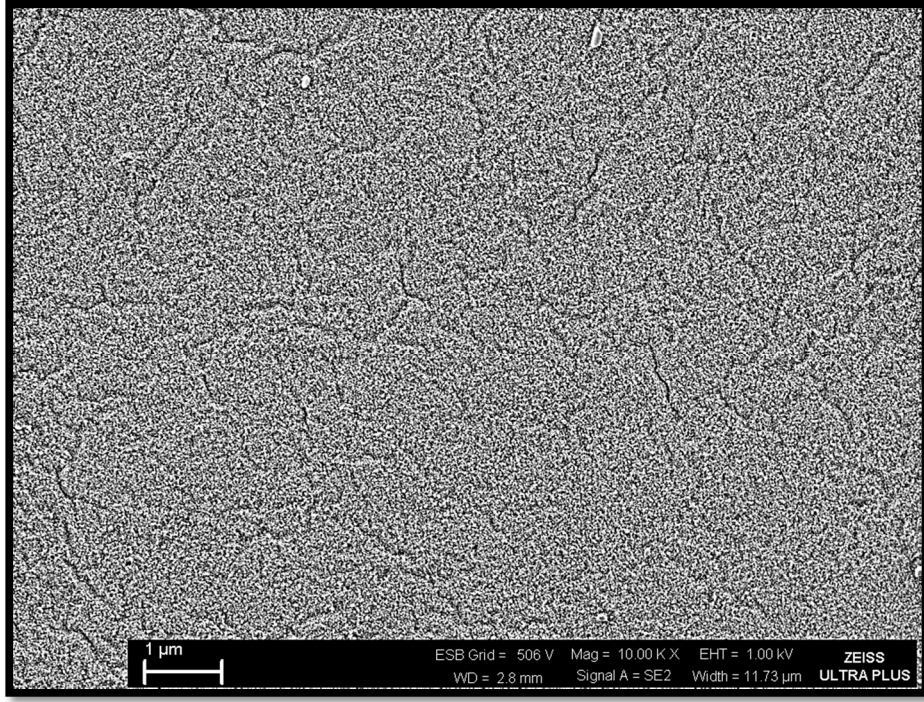


a)

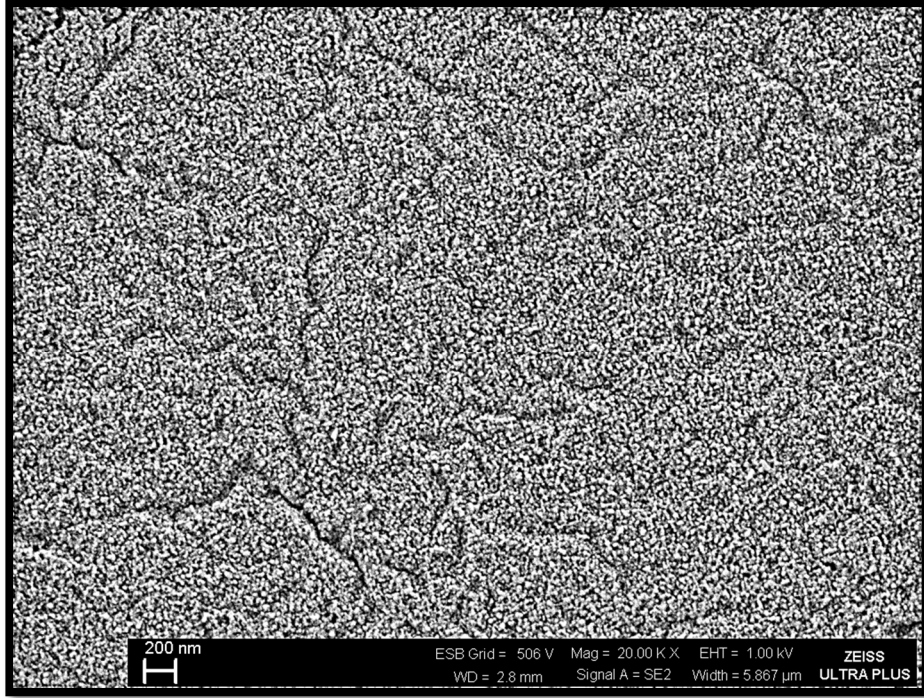


b)

Şekil 2.9. % 0,1at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

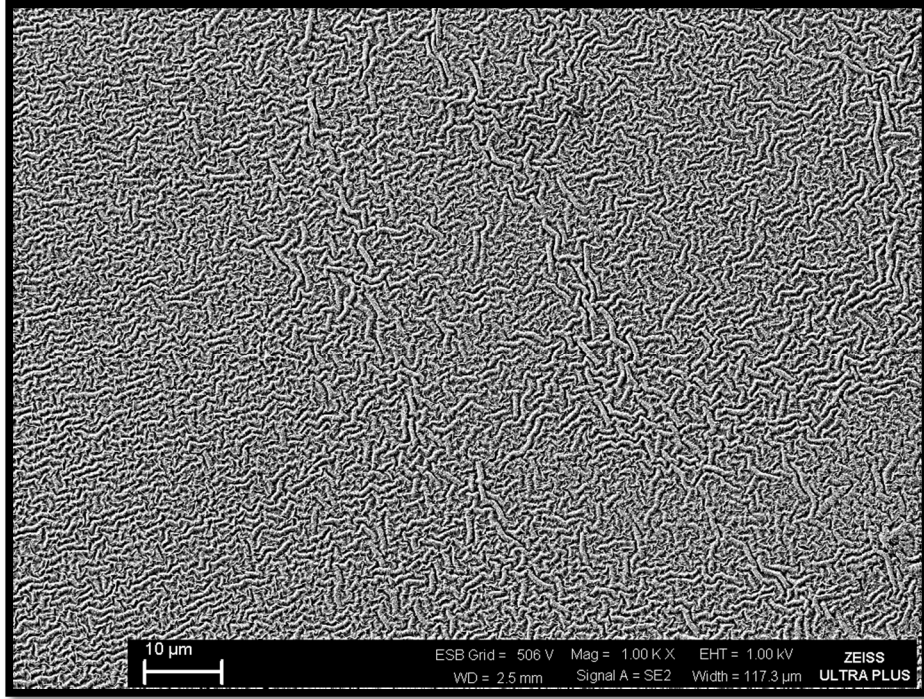


a)

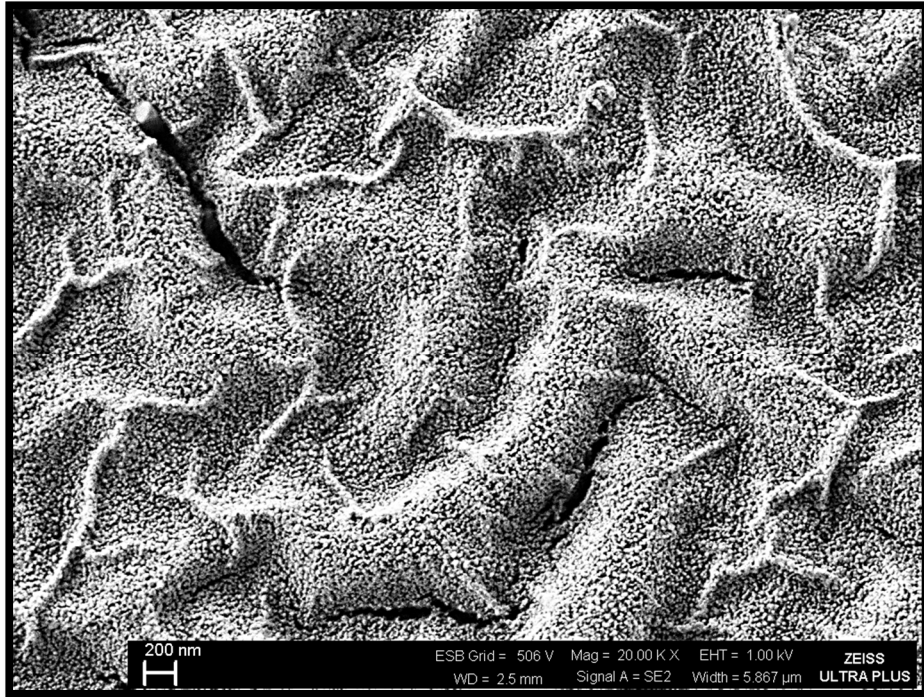


b)

Şekil 2.10. % 0,5at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 1 μ m b) 200 nm

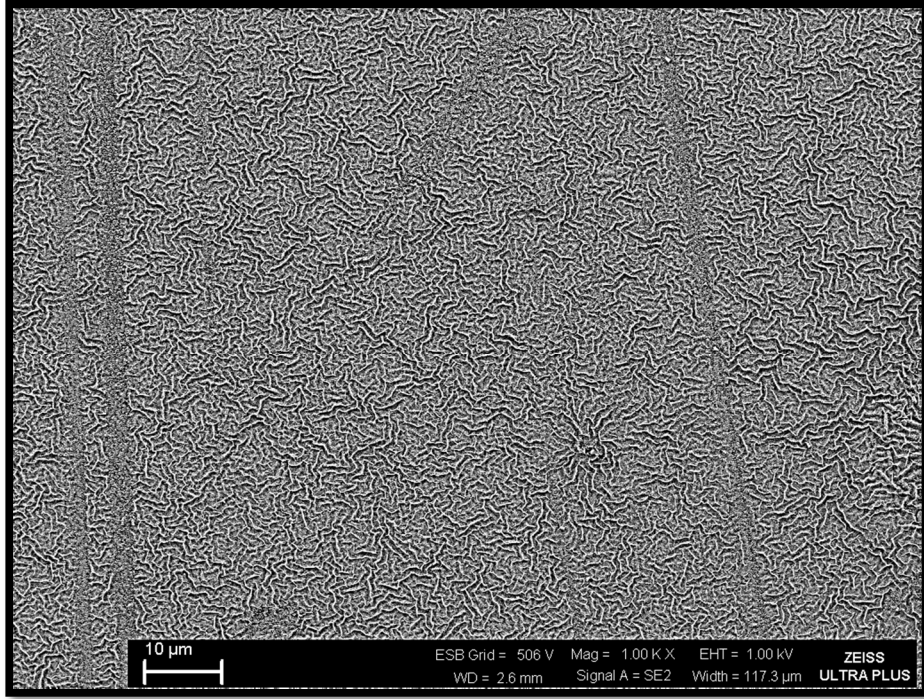


a)

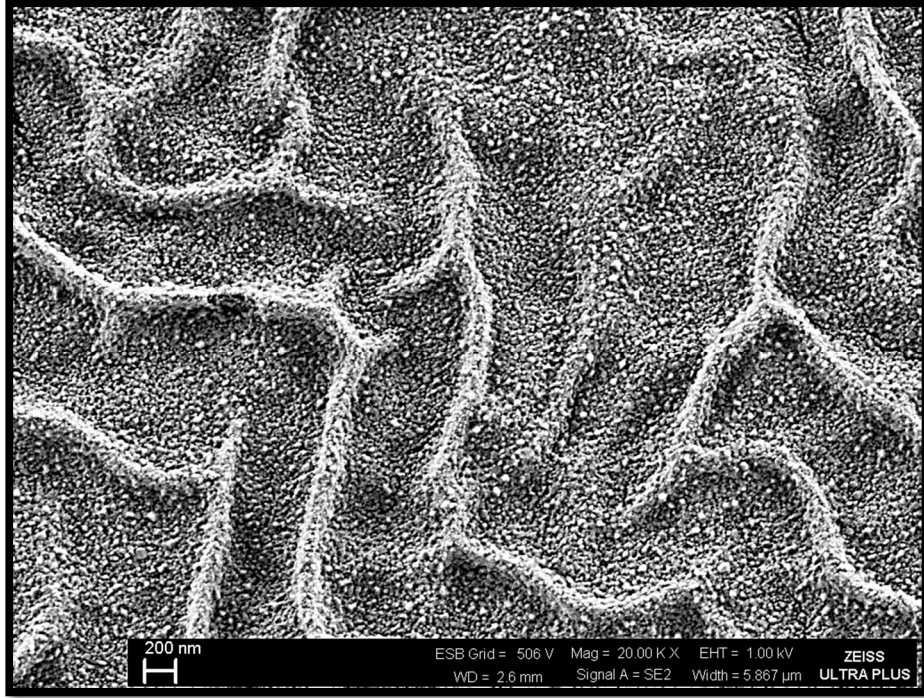


b)

Şekil 2.11. % 1at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

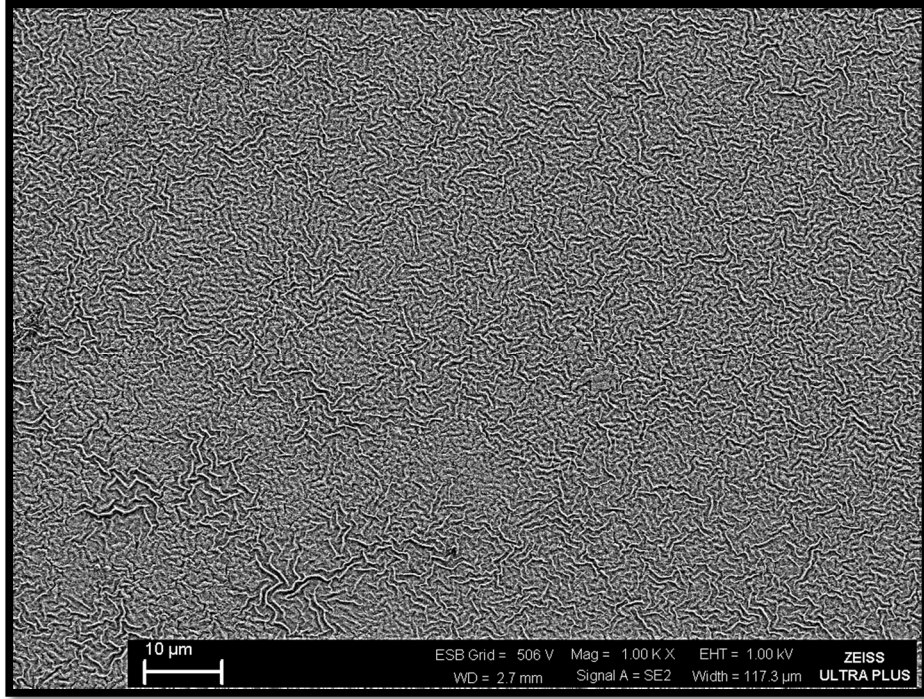


a)

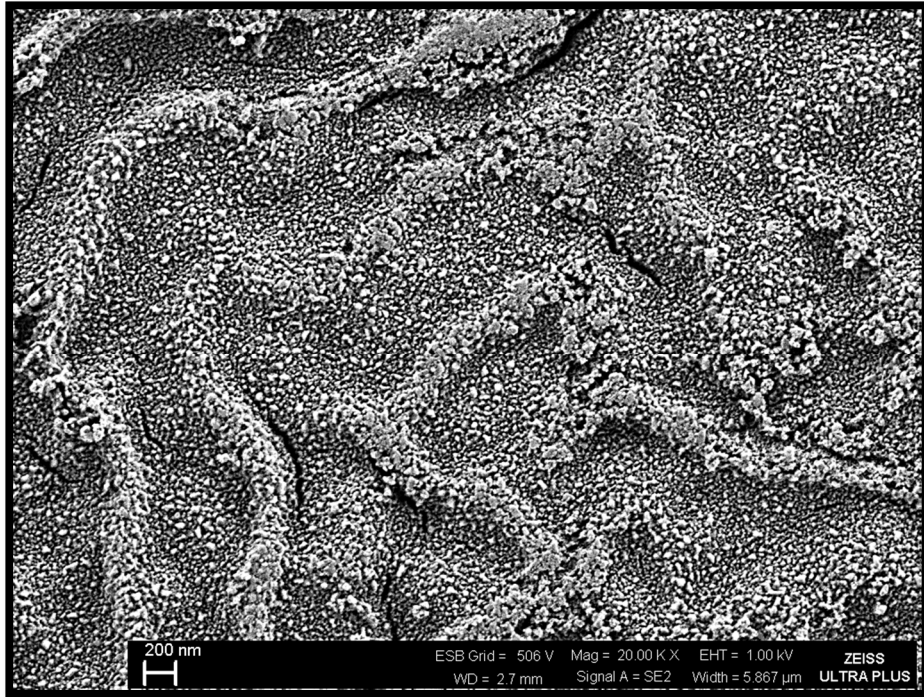


b)

Şekil 2.12. % 2at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm



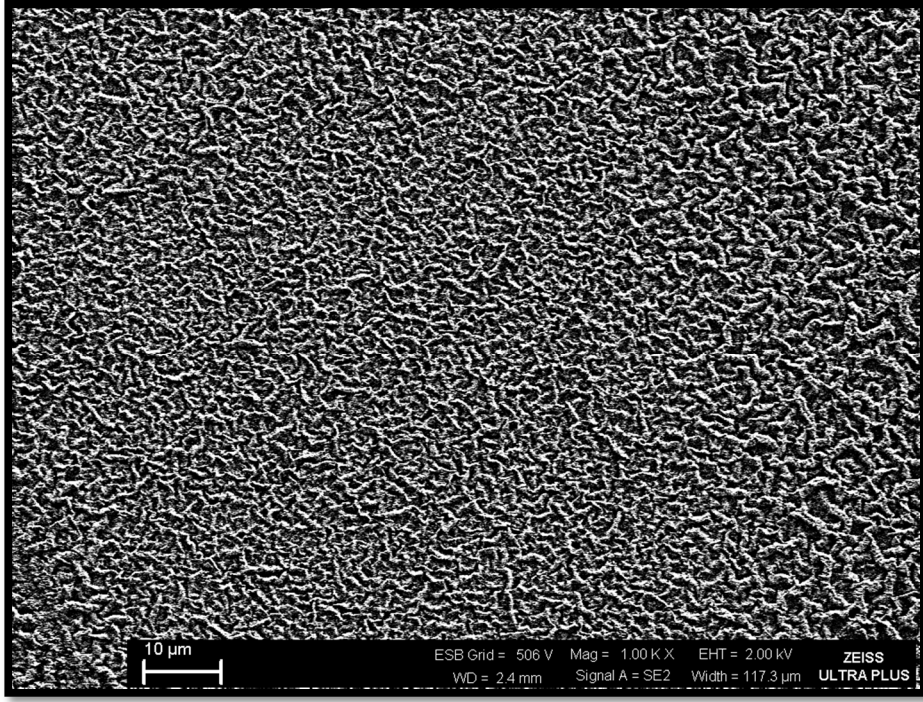
a)



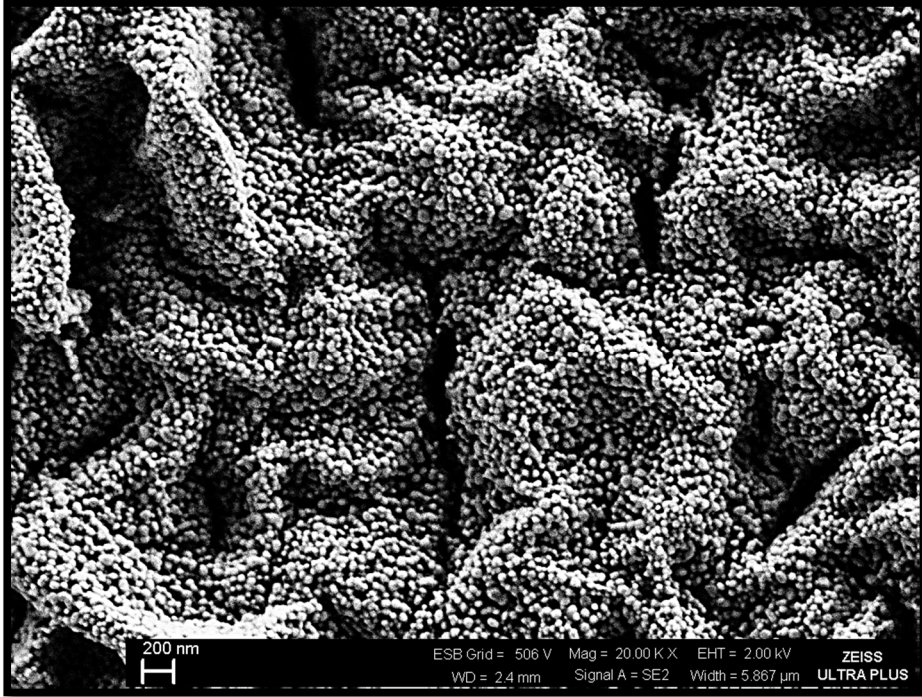
b)

Şekil 2.13. % 5at. Al katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

Şekil 2.14 ile şekil 2.19 arasında verilen Cu katkılı ZnO için filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde katkısız ZnO için yapının kalın fiberlerden oluştuğu ve tanelerin daha belirgin olduğu, artan katkıyla beraber fiberlerin neredeyse kaybolduğu ancak % 2at. Cu katkısıyla yeniden belirginleşmeye başladığı görülmektedir. Cu konsantrasyonunun artmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri de değişmektedir. Farklı katkı oranlarında aynı büyütme oranına sahip (2.000X) Cu katkılı ZnO filmleri incelendiğinde katkısız, % 0,1at. Cu ve % 0,5at. Cu katkılı ZnO filmlerinde fiberler içerisinde çatlaklar görülüp, fiberlerin net olmadığı görülmektedir. % 1at. Cu katkılı ZnO filmi için homojen bir dağılıma sahip tanelerden oluştuğu ve bu tanelerin katkısız, % 0,1 at. ve % 0,5 at. Cu katkılı ZnO'ye göre oldukça küçülmüş olduğu ve fiberlerinde azaldığı söylenebilir. % 2at. Cu katkılı ZnO filminde ise fiberler belirginleşmeye başlamış ve arada çatlaklar oluşmuştur. % 5at. Cu katkılı ZnO filminde ise fiberler belirgin ve çatlaklar çok aza indirgenmiştir.

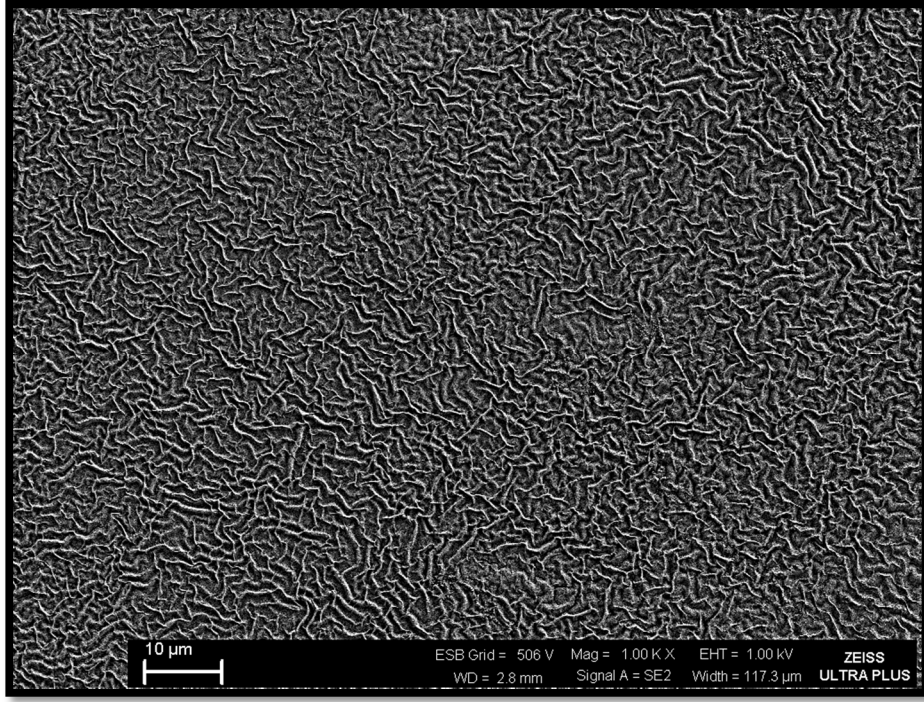


a)

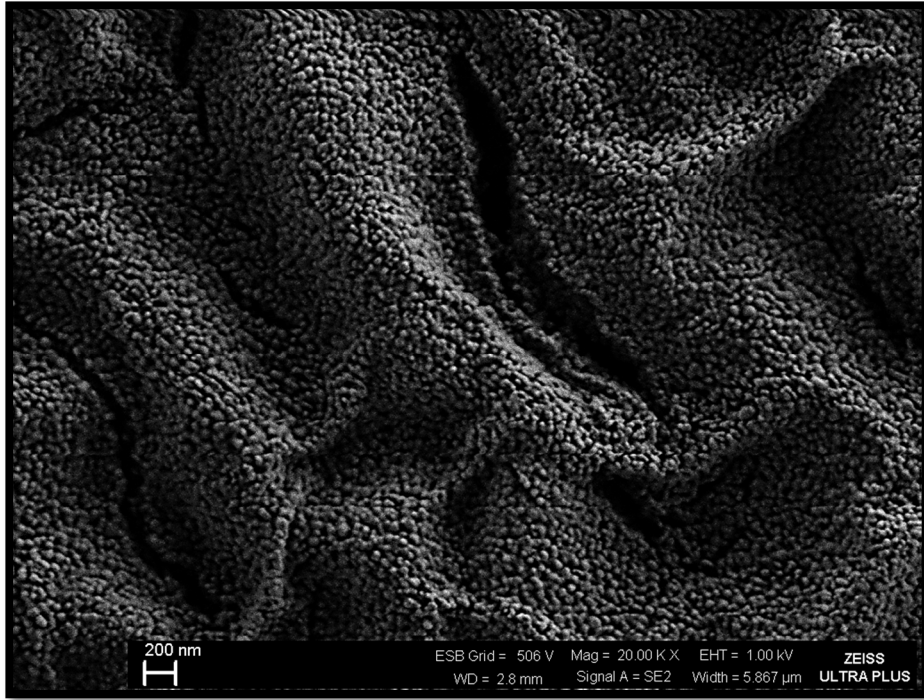


b)

Şekil 2.14. Katkısız ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

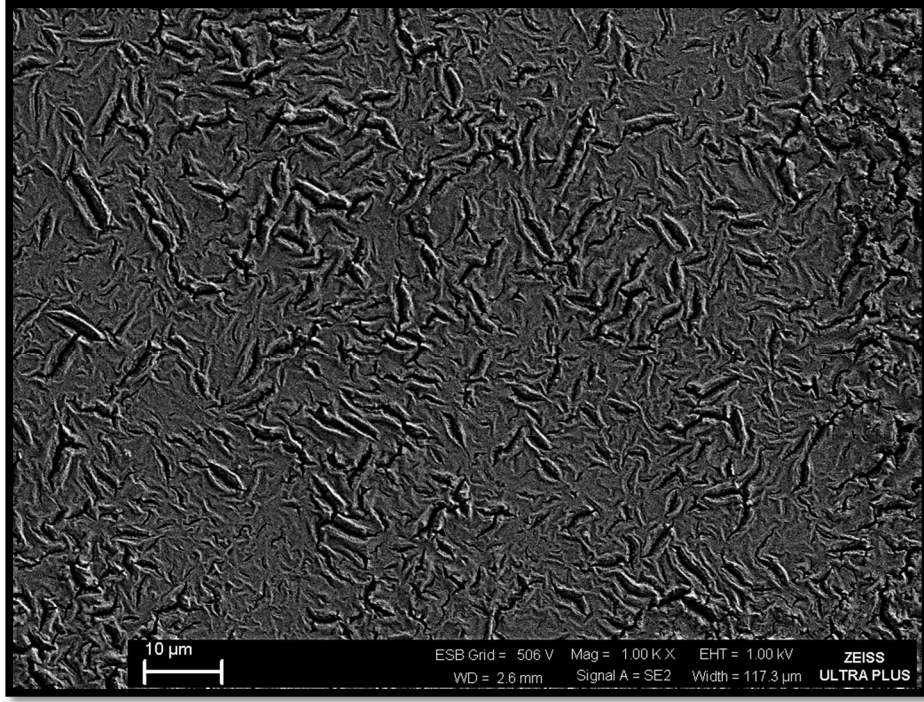


a)

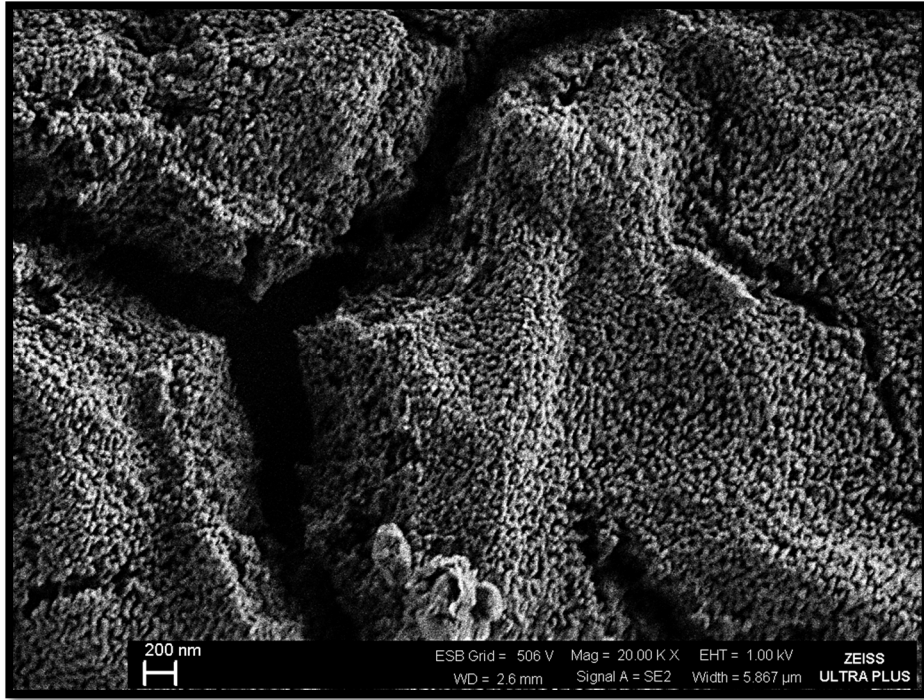


b)

Şekil 2.15. % 0,1at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 µm b) 200 nm

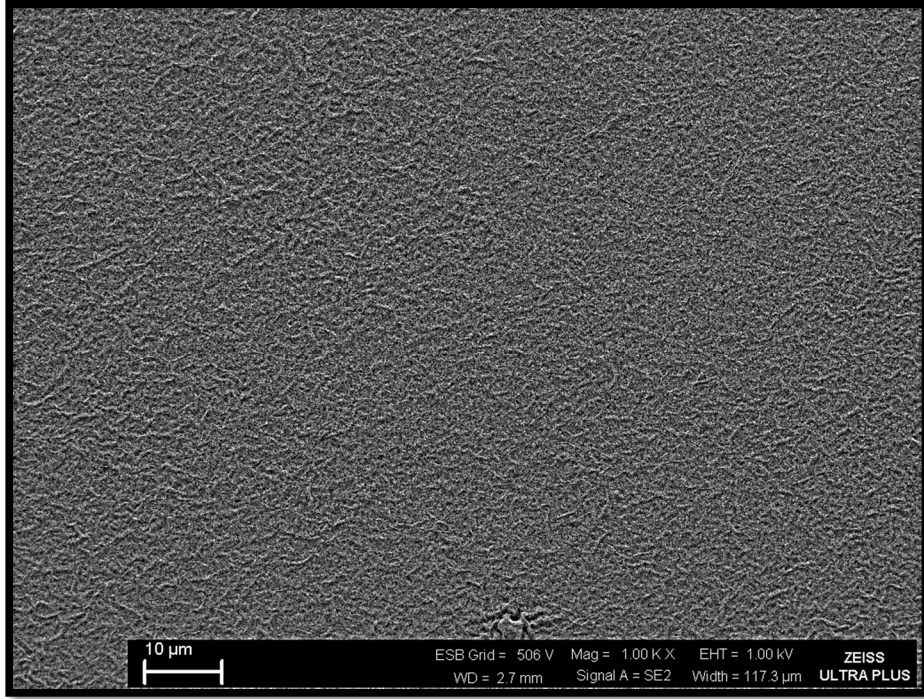


a)

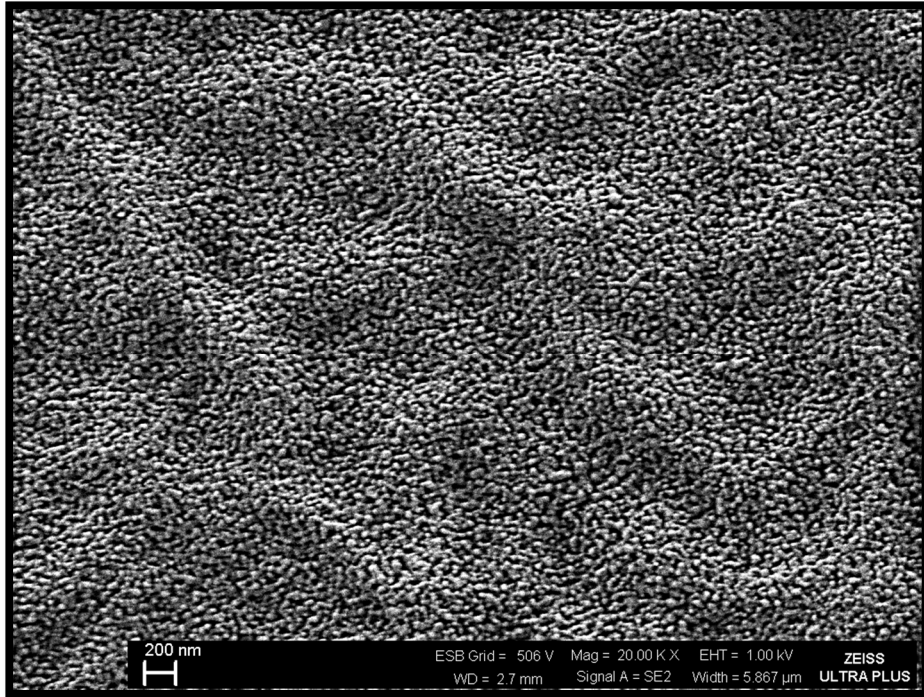


b)

Şekil 2.16. % 0,5at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

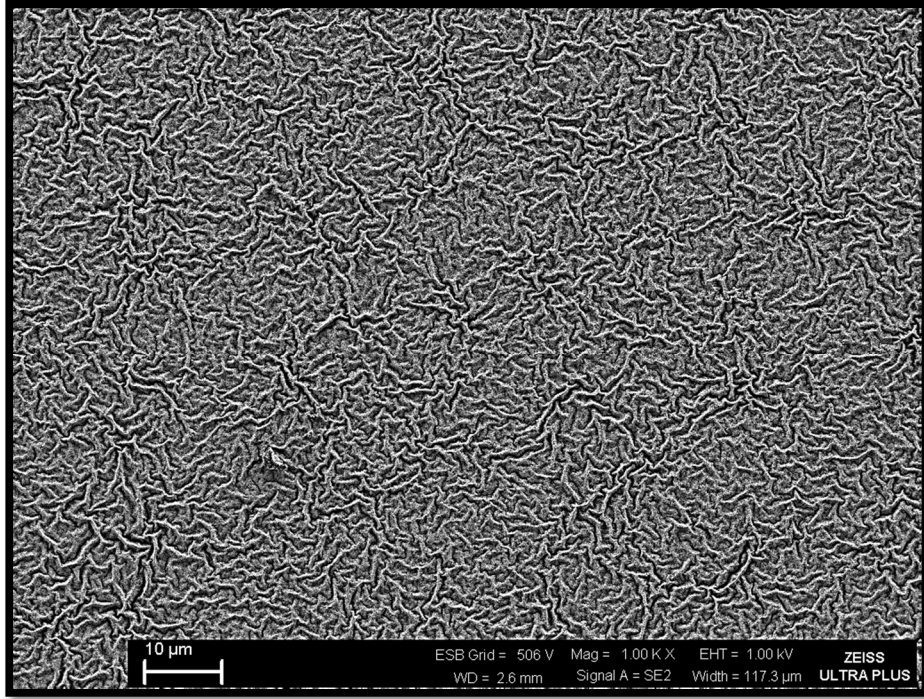


a)

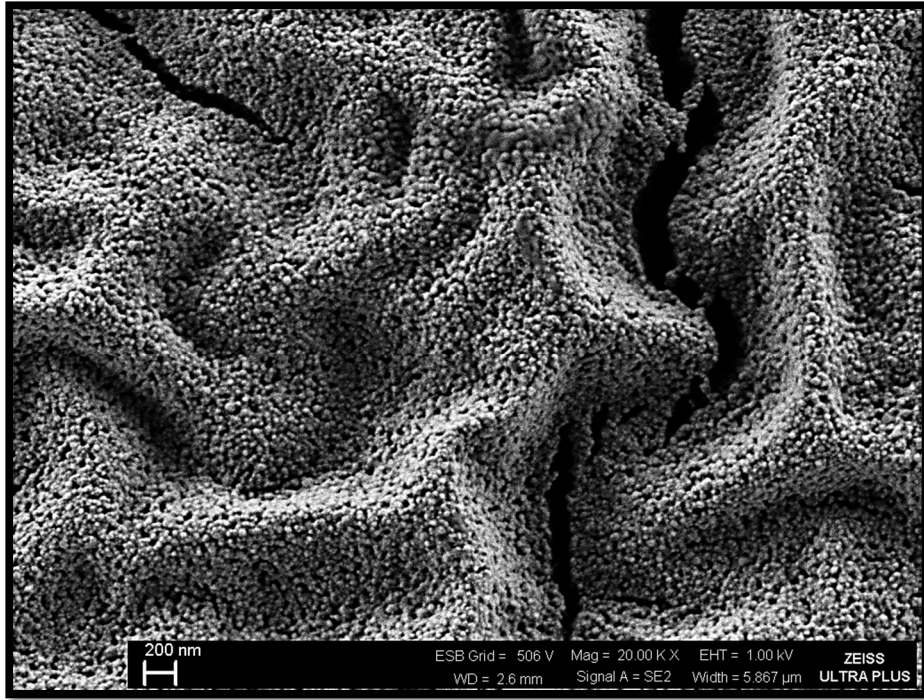


b)

Şekil 2.17. % 1at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

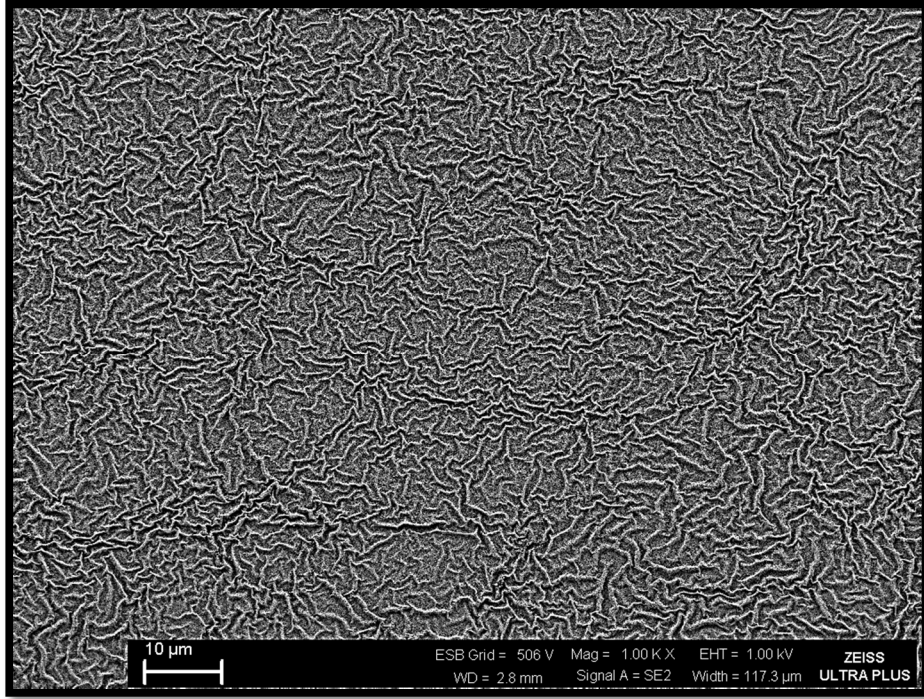


a)

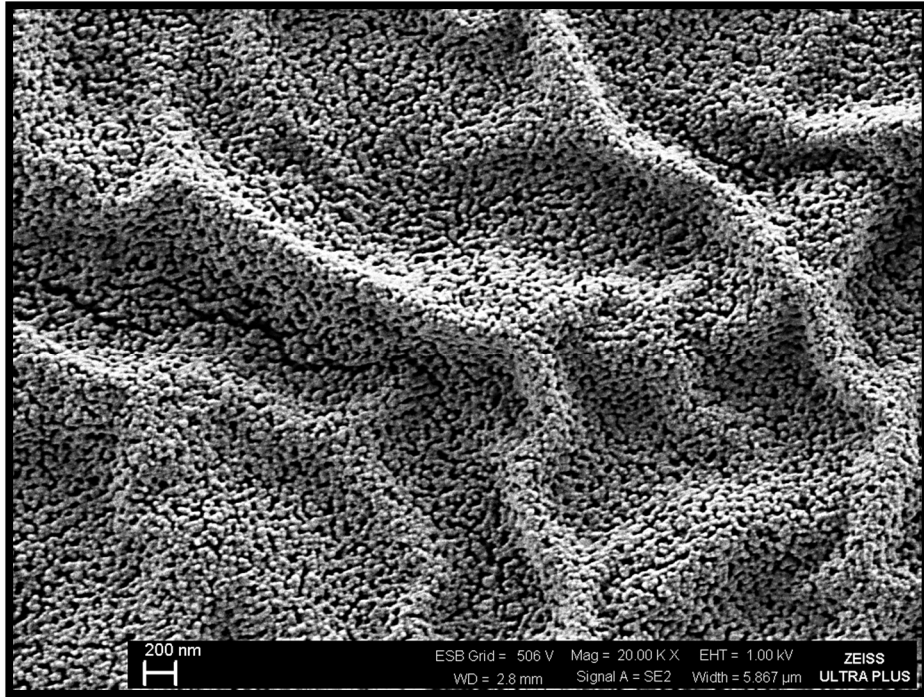


b)

Şekil 2.18. % 2at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm



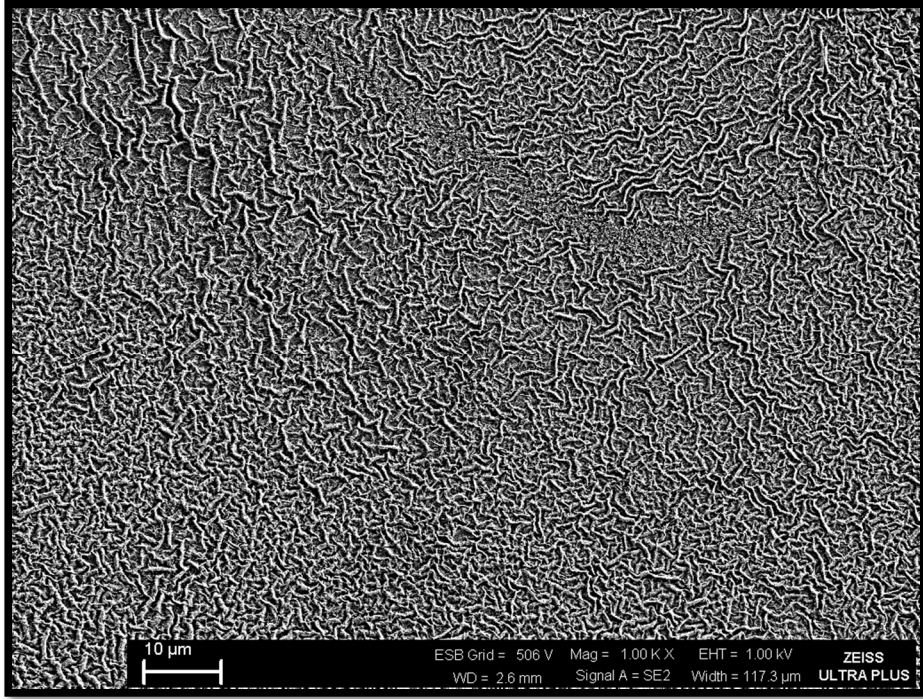
a)



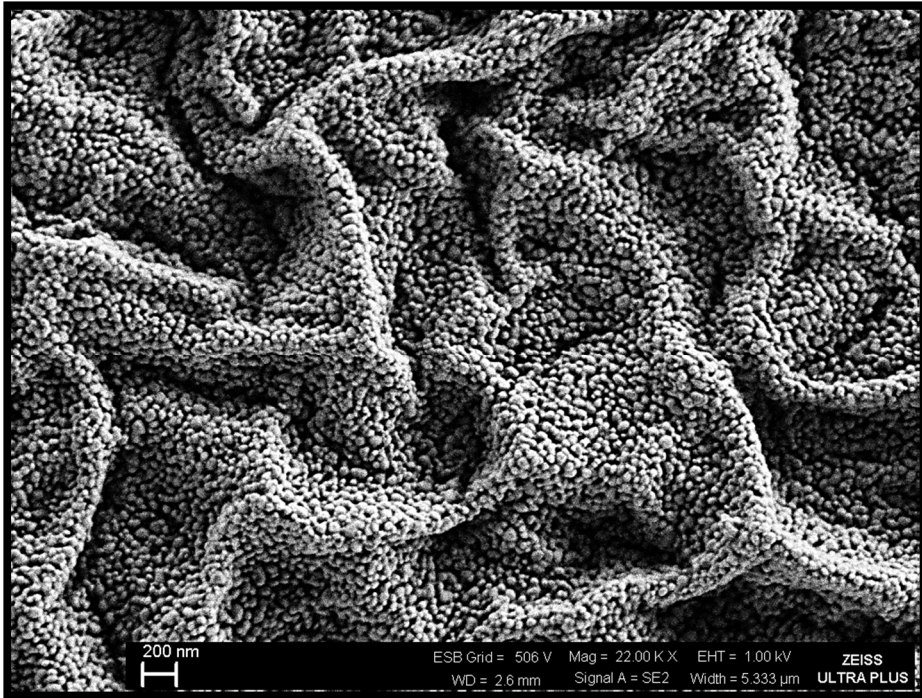
b)

Şekil 2.19. % 5at. Cu katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μ m b) 200 nm

Şekil 2.20 ile şekil 2.25 arasında verilen Sn katkılı ZnO için filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde katkısız ZnO için tane büyüklükleri ve fiberlerin daha belirgin olduğu, katkının artmasıyla fiberlerin giderek incelendiği ve tane boyutunda giderek azaldığı ancak % 1at. Sn katkısıyla fiberlerin yeniden belirginleşmeye başladığı, tanelerin büyüdüğü ve yüzey pürüzlülüğünde arttığı görülmektedir. Sn miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri de değişmektedir. Farklı katkı miktarlarında aynı büyütme oranına sahip (2.000X) Sn katkılı ZnO filmleri incelendiğinde katkısız, % 0,1at. Sn ve % 0,5at. katkılı ZnO filmlerinde yüzeyin oldukça homojen, fiberlerin ise gayet belirgin olduğu görülmektedir. % 0,5at. Sn katkılı ZnO için fiberler oldukça küçülerek görülmeyecek duruma gelmiş ve taneler oldukça küçülmüştür. % 1at. Sn katkılı ZnO filmde ise fiberler belirginleşmeye başlamıştır. % 2at. Sn katkılı ZnO filmde ise fiberlerin belirginleşmesi kaybolmuş ve % 5at. Sn katkılı ZnO için ise fiberler tekrardan belirginleşmiştir.

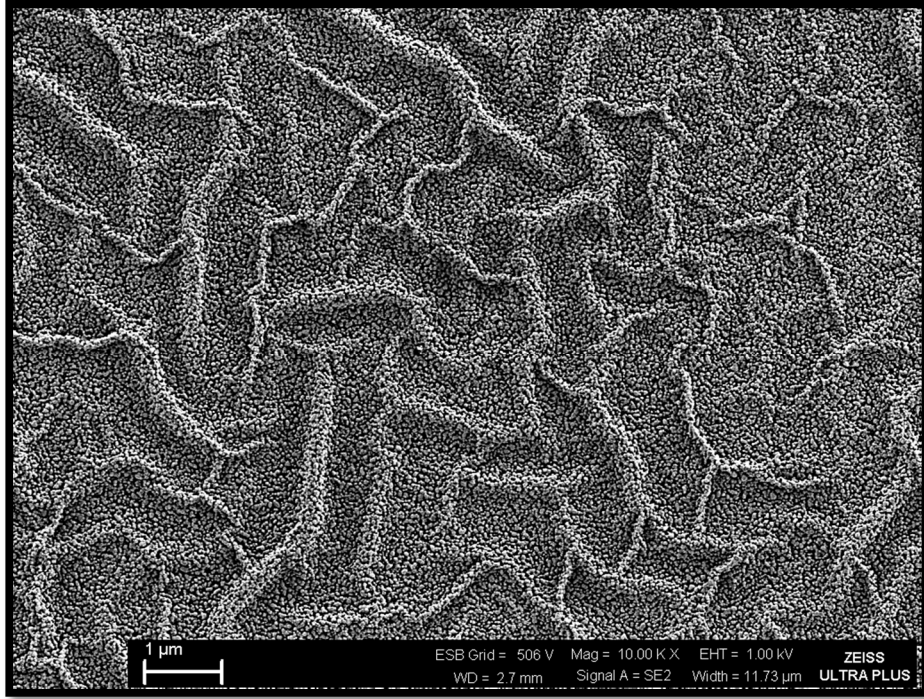


a)

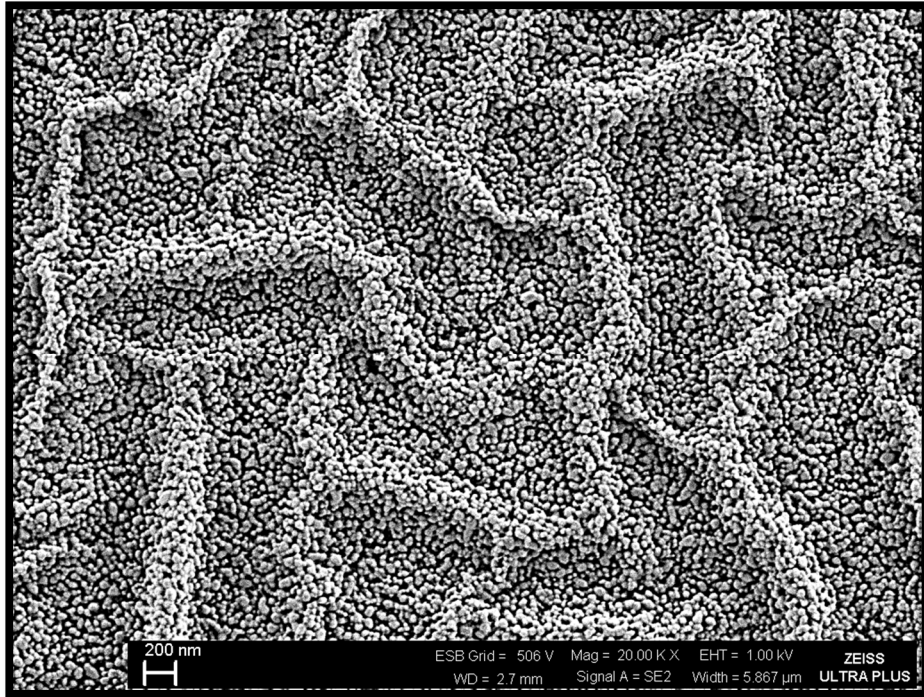


b)

Şekil 2.20. Katkısız ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

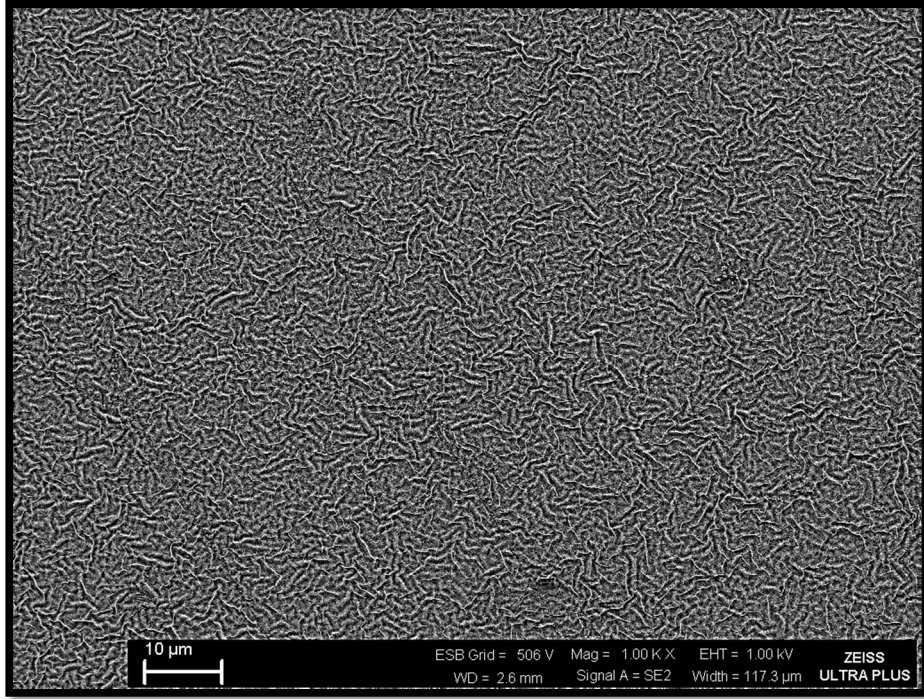


a)

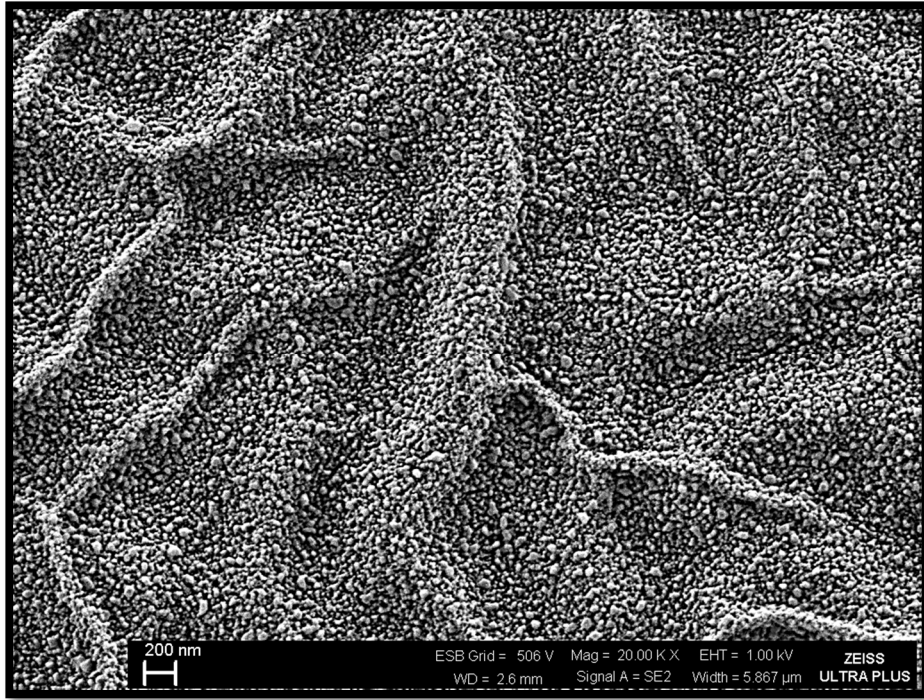


b)

Şekil 2.21. % 0,1at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 1 μm b) 200 nm

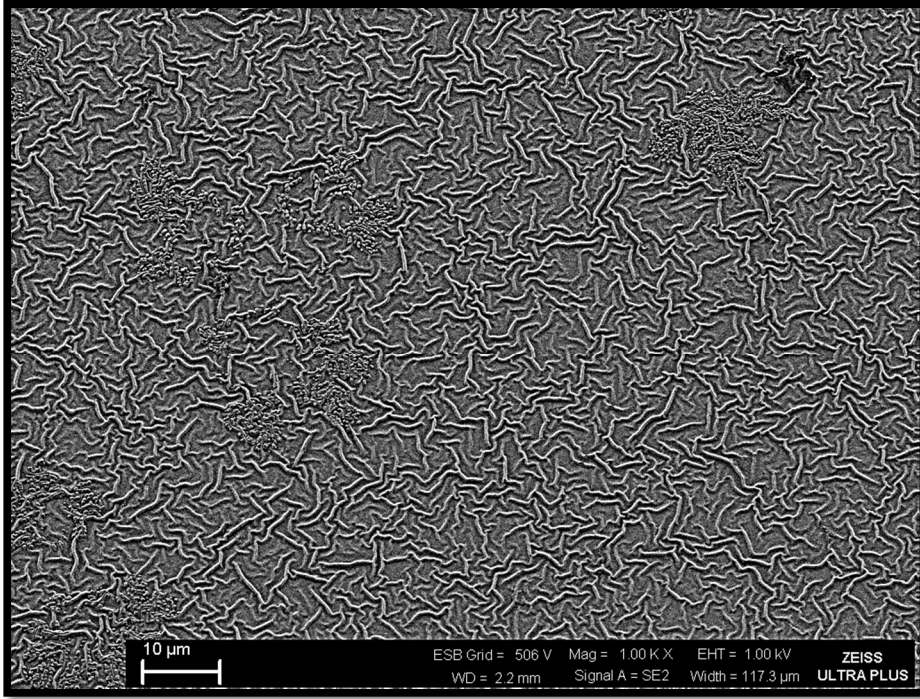


a)

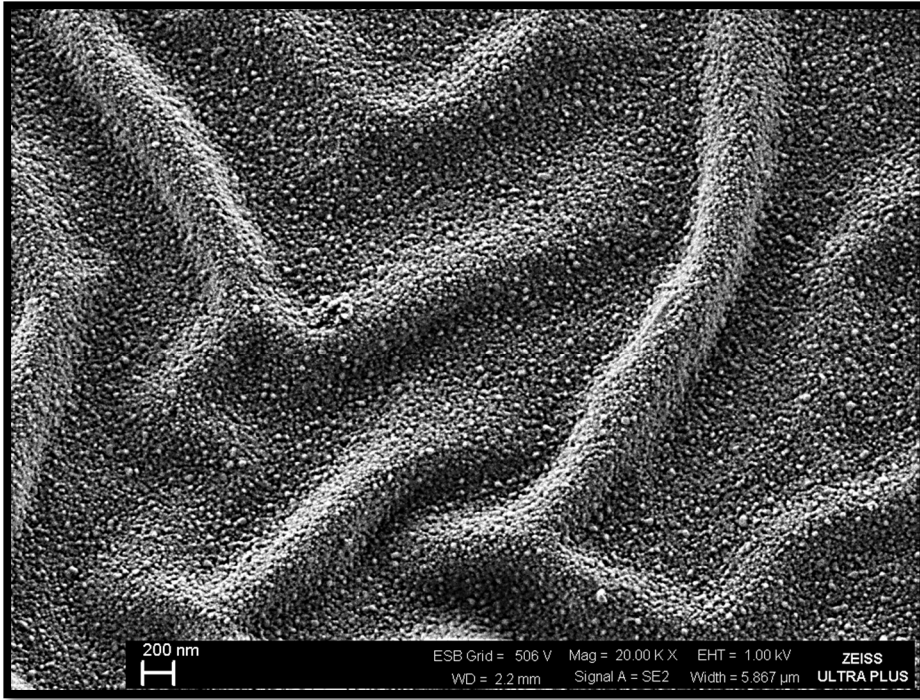


b)

Şekil 2.22. % 0,5at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

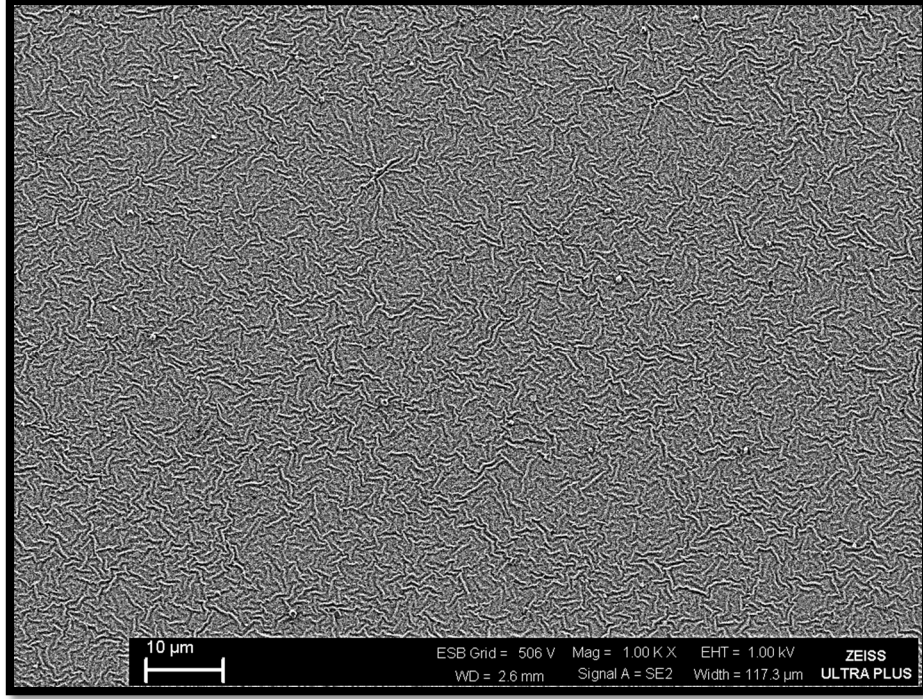


a)

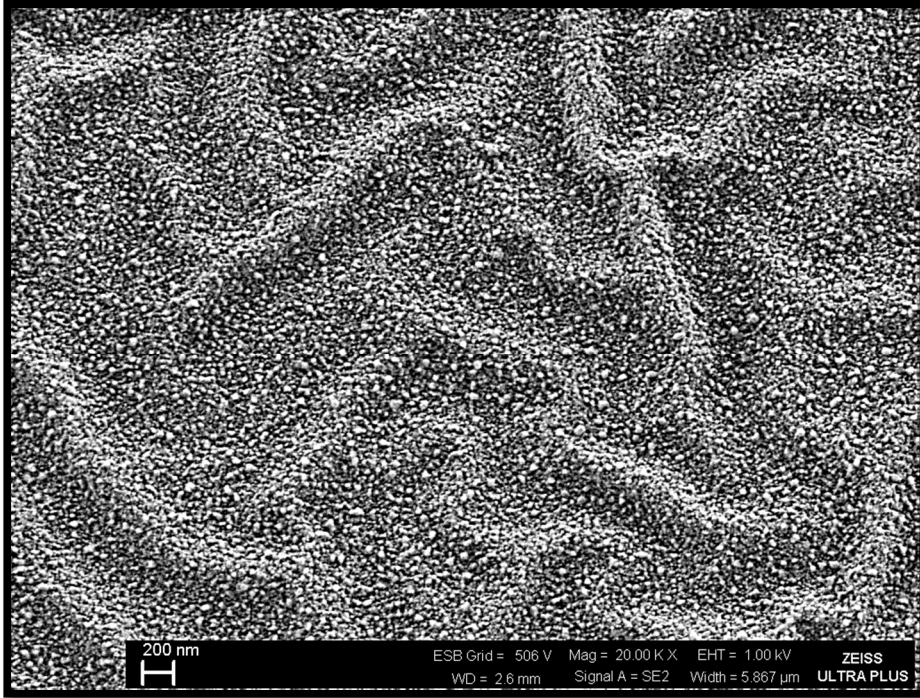


b)

Şekil 2.23. % 1at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm

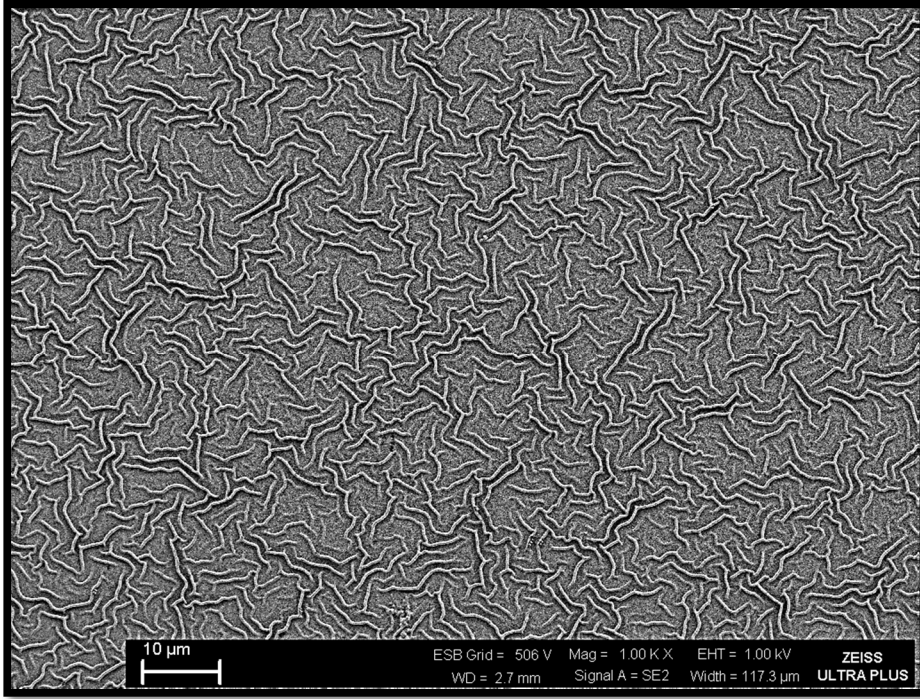


a)

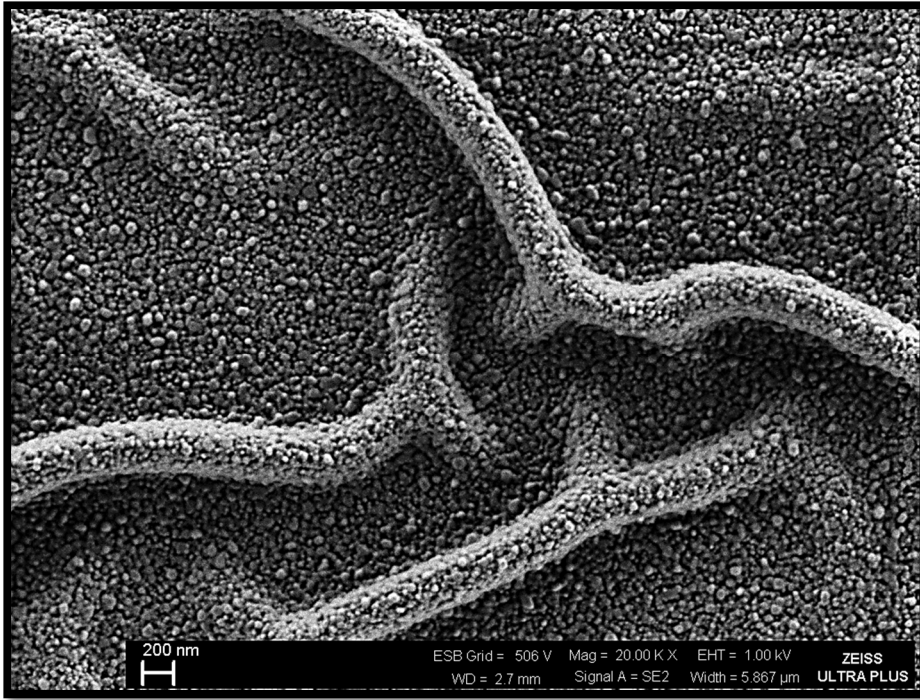


b)

Şekil 2.24. % 2at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μm b) 200 nm



a)

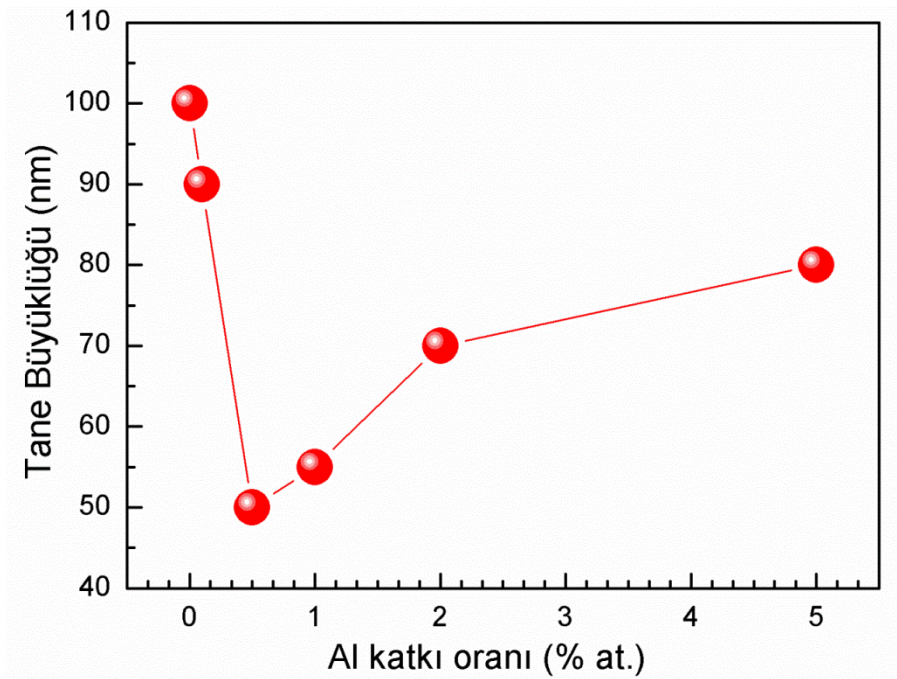


b)

Şekil 2.25. % 5at. Sn katkılı ZnO için SEM görüntüleri a) 10 μ m b) 200 nm

SEM görüntülerinden filmlerin tane büyüklükleri ölçülmüş ve şekil 2.26, şekil 2.27 ve şekil 2.28' de verilmiştir.

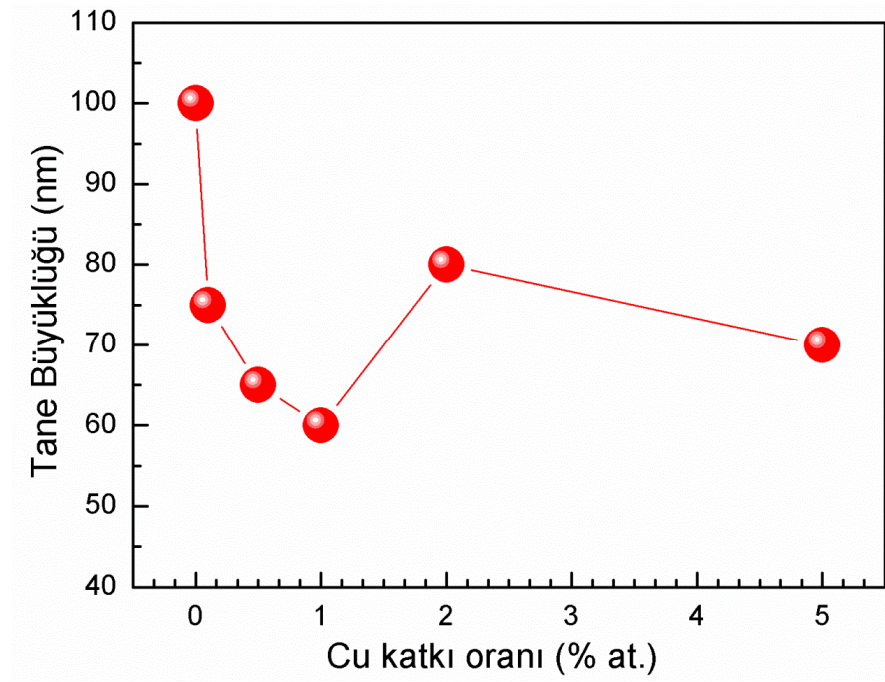
Artan Al katkı oranına göre tane büyüklüğünün değişim grafiği incelendiğinde % 0,5at. Al katkı oranına kadar ilave edilen katkı miktarları tane büyüklüğünü düşürmüş, % 1at. Al katkısı ile beraber tane boyutunun artmaya başladığı görülmüştür. Al katkısı ile tane büyüklüklerinde değişimler olsa da en büyük tane boyutu katkısız ZnO numunesinde ölçülmüştür. Yani başka bir deyişle Al katkısı, ZnO'in tane büyüklüğünü genel olarak azaltmıştır.



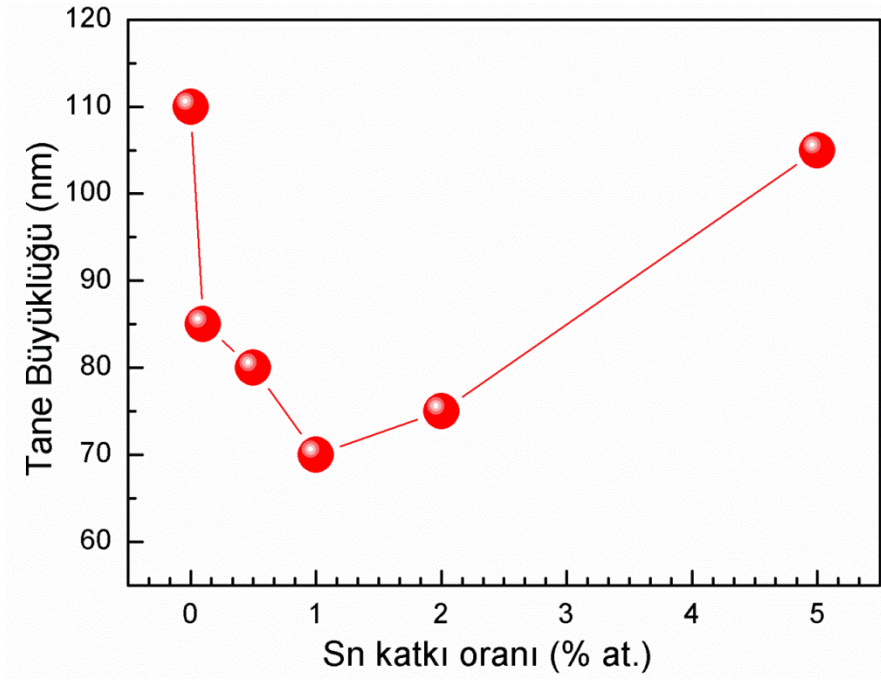
Şekil 2.26. Tane büyüklüğünün Al katkısına göre değişimi

Cu katkısı ile tane büyüklüğünün değişim grafiği incelendiğinde % 1at. Cu katkı oranına kadar ilave edilen katkı miktarları ile tane büyüklüğünün azaldığı, % 2at. Cu katkısıyla tane boyutunun arttığı fakat % 5at. Cu katkısı ile tekrar azaldığı görülmüştür. Cu katkısı ile tane büyüklüklerinde değişimler görülmüş ve en büyük tane büyüklüğü katkısız ZnO numunesinde ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre Cu katkısı, ZnO'in tane büyüklüğünü genel olarak azaltmıştır.

Sn katkısı ile tane büyüklüğündeki değişim, % 1 at. Sn katkı oranına kadar ilave edilen katkı miktarları ile azalma görülüp, artan katkı oranlarında ise artma şeklinde gözlenmiştir. Sn katkısı ile tane büyüklüklerinde değişimler olsa da en büyük tane büyüklüğü katkısız ZnO numunesinde ölçülmüştür. Yani, Sn katkısı ZnO'in tane büyüklüğünü genel olarak azaltmıştır.



Şekil 2.27. Tane büyüklüğünün Cu katkısına göre değişimi



Şekil 2.28. Tane büyüklüğünün Sn katkısına göre değişimi

2.4. Numunelerin AFM Yüzey Görüntüleri

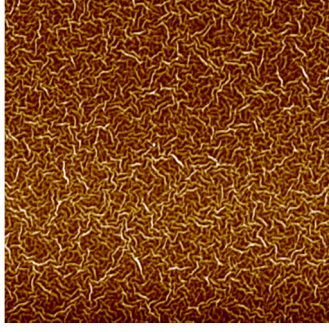
Üretilen numunelerin yapısal özelliklerini incelemek amacıyla yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri PARK SYSTEM marka XE-100E model Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile çekilmiştir (Şekil 2.29).



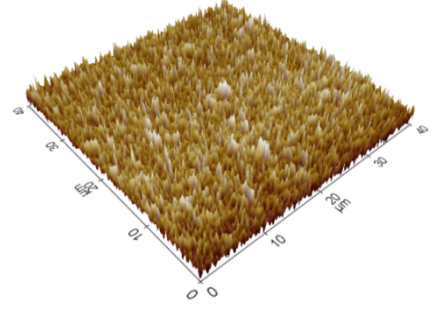
Şekil 2.29. YüzeY Morfolojisini incelemede kullanılan atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Numunelerin oluşum aşamalarının yapısal özellikleri incelenmiştir. Numune yüzeylerinden görüntü almak için Non-kontak mod da çalışılmış ve buna uygun cantilever kullanılmıştır. Hazırlanan ince film numunelerin $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$, $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ ve $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ boyutlarında görüntüleri alınmıştır. AFM yardımıyla ölçülen numunelerin yapısal özelliklerine ait yüzeY topografyasını gösteren 2 ve 3 boyutlu resimler şekil 2.30-2.137’de verilmiştir.

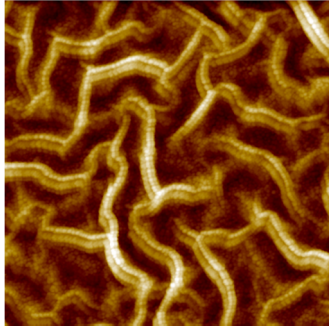
Al katkılı ZnO numuneleri için alınan AFM görüntüleri şekil 2.30-2.65’de verilmiştir. Katkısız ZnO ince filminin AFM görüntüsü incelendiğinde küçük tanelerin birbirleriyle birleşmesinden fiberlerin oluştuğu söylenebilir. Al katkısı ile birlikte ZnO fiberlerine ilaveten yeni ince fiberlerin ortaya çıktığı, katkı oranının giderek artmasıyla birlikte fiberlerin kalınlaştığını ve tane büyüklüğünde arttığı görülmektedir. % 0,1at. Al ilavesi ile tane büyüklüğünde bir düşüş gözlenmiş ve artan Al ilavesi ile ortalama tane büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir. YüzeY pürüzlülüğünde ise katkı miktarının artması başta pürüzlülükte bir düşüşe sebep olsa da % 5at. Al ilavesi ile maksimum değere çıktığı görülmüştür.



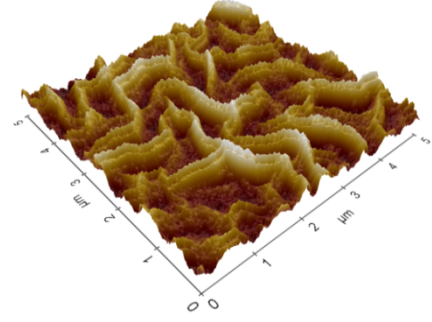
Şekil 2.30. Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



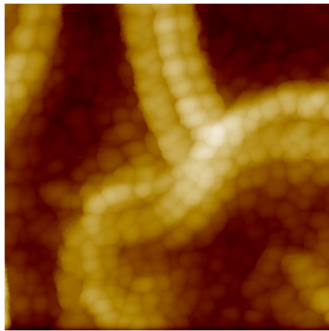
Şekil 2.33. Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



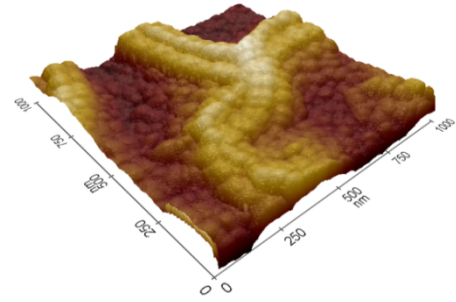
Şekil 2.31. Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



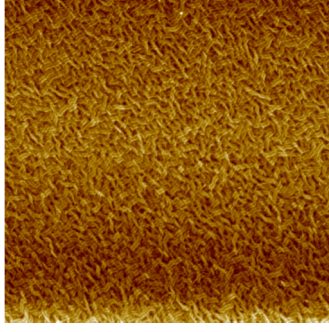
Şekil 2.34. Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



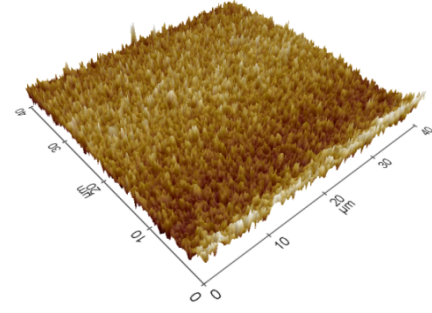
Şekil 2.32. Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



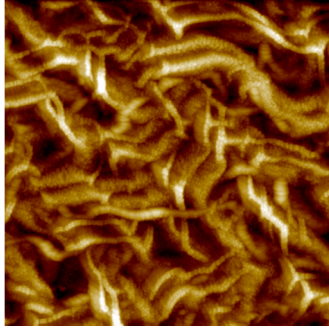
Şekil 2.35. Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



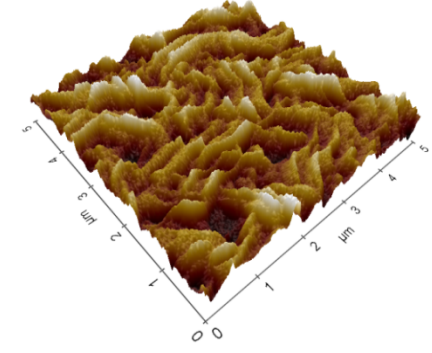
Şekil 2.36. % 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



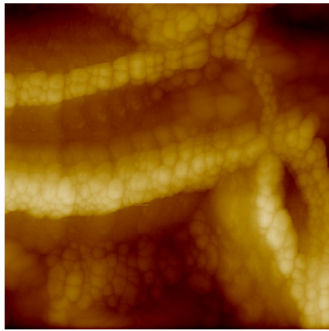
Şekil 2.39. % 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



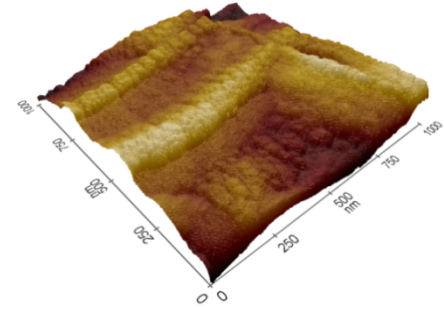
Şekil 2.37. % 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



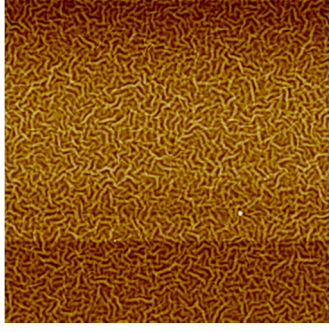
Şekil 2.40. % 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



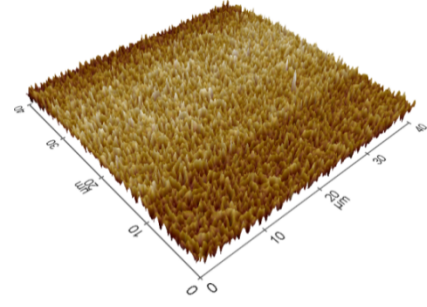
Şekil 2.38. % 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



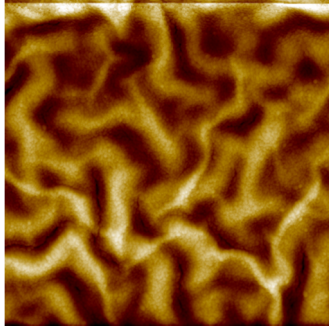
Şekil 2.41. % 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



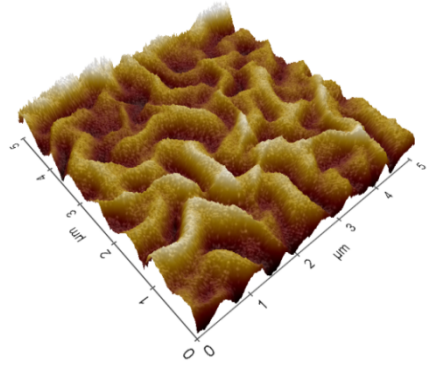
Şekil 2.42. % 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



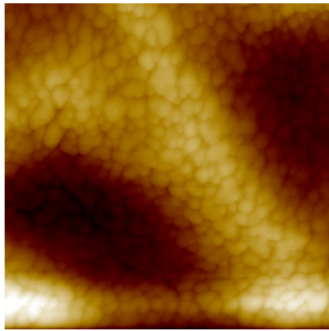
Şekil 2.45. % 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



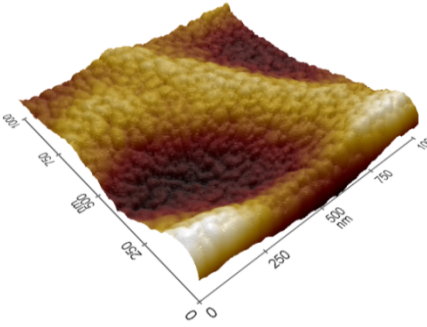
Şekil 2.43. % 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



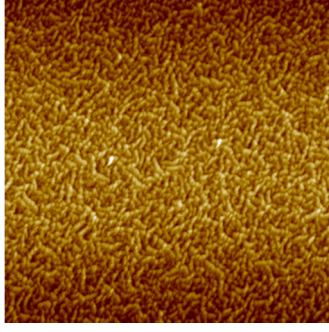
Şekil 2.46. % 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



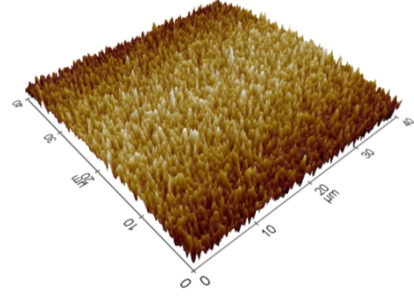
Şekil 2.44. % 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



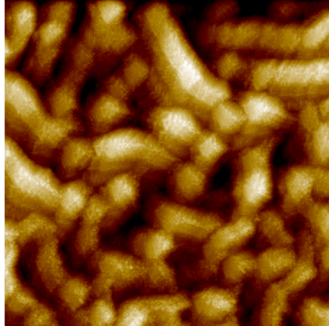
Şekil 2.47. % 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



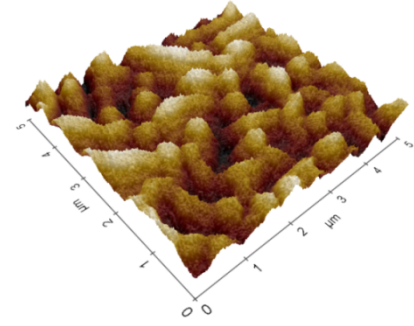
Şekil 2.48. % 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



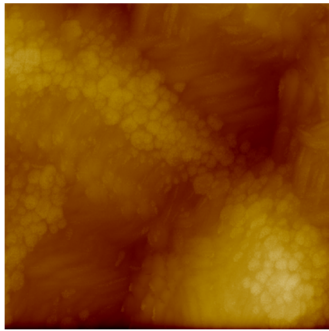
Şekil 2.51. % 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



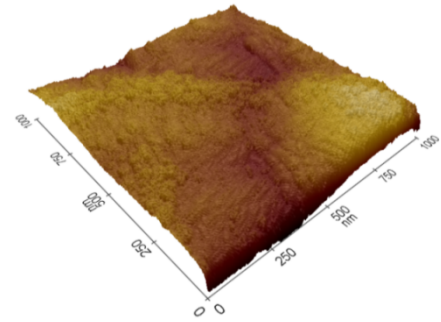
Şekil 2.49. % 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



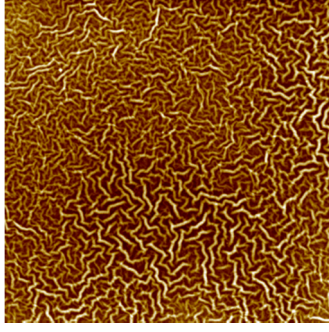
Şekil 2.52. % 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



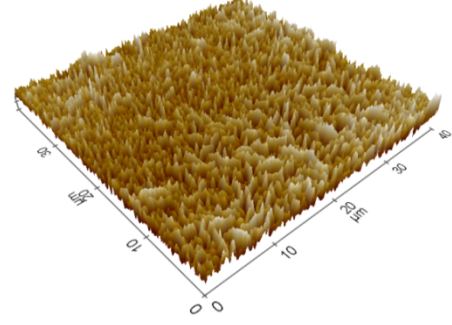
Şekil 2.50. % 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



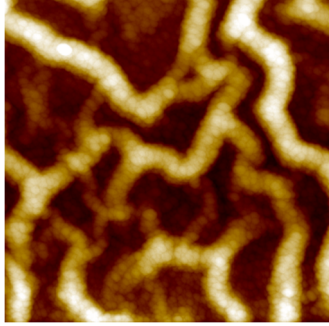
Şekil 2.53. % 1at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



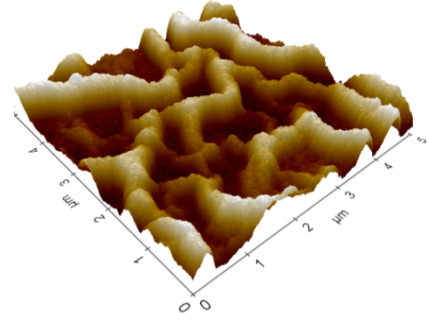
Şekil 2.54. % 2at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



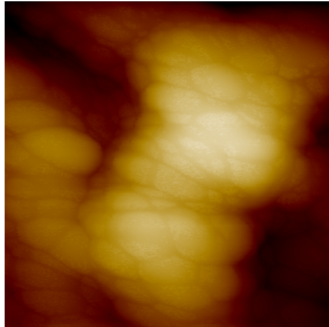
Şekil 2.57. % 2at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



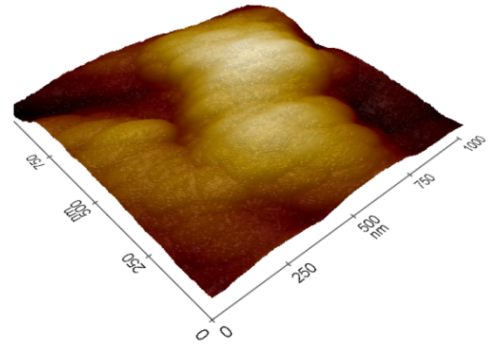
Şekil 2.55. % 2at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



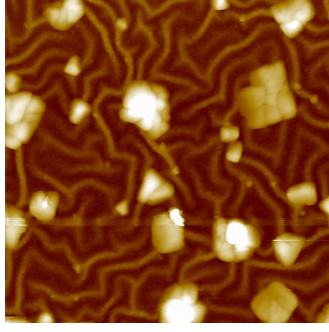
Şekil 2.58. % 2at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



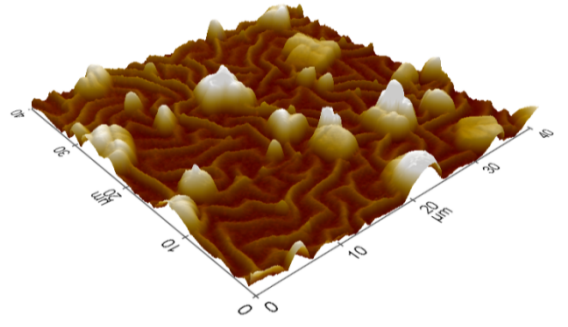
Şekil 2.56. % 2at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



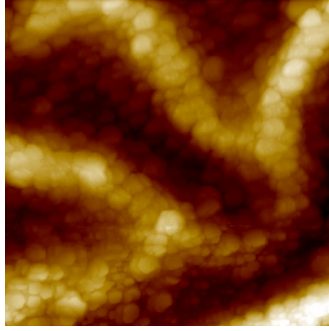
Şekil 2.59. % 2at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



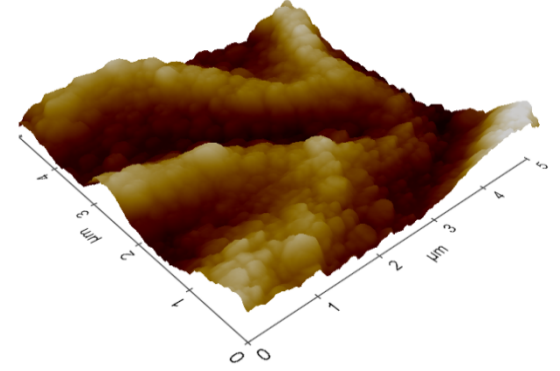
Şekil 2.60. % 5at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



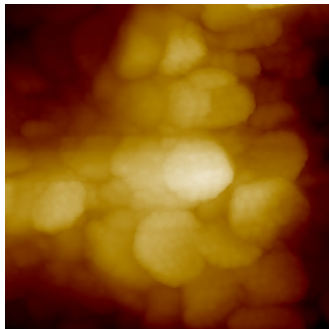
Şekil 2.63. % 5at. Al katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



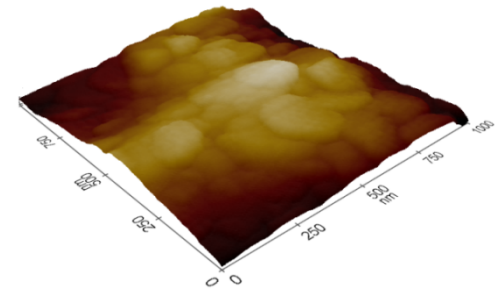
Şekil 2.61. % 5at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 2.64. % 5at. Al katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü

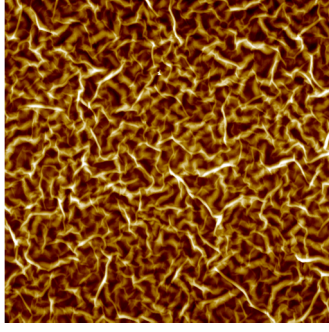


Şekil 2.62. % 5at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü

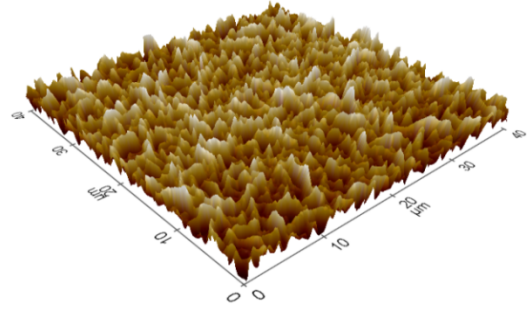


Şekil 2.65. % 5at. Al katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü

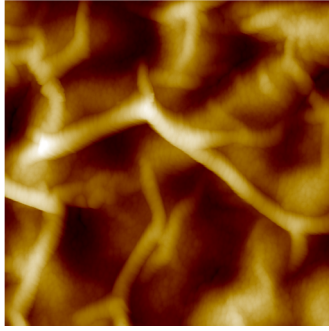
Cu katkılı ZnO numuneleri için alınan AFM görüntüleri şekil 2.66-2.101'de verilmiştir. Cu katkılı ZnO ince filmleri içinde fiber kalınlıklarında ve tane büyüklüklerinde değişimler gözlenmiştir. %1at. Cu ilavesine kadar tane büyüklüklerinin azaldığı ve artan Cu ilavesi ile ortalama tane büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde ise % 0,1at. Cu ilavesi ile artış göstermesine rağmen ilave miktarı % 1at. Cu katkısı oluncaya dek bariz bir düşüş gözlenmiş, % 2at. Cu ilavesinden sonrada maksimum değere çıktığı görülmüştür.



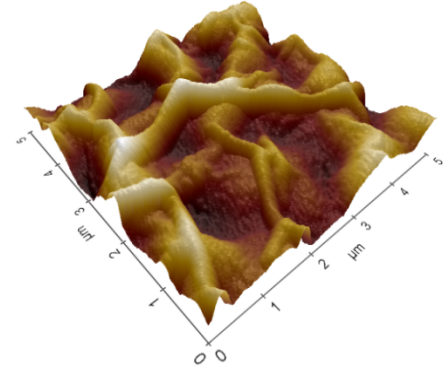
Şekil 2.66. Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



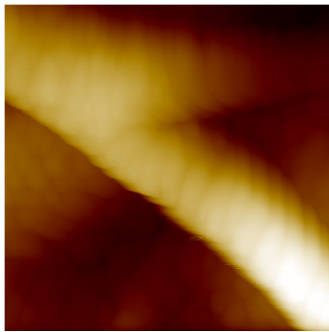
Şekil 2.69. Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



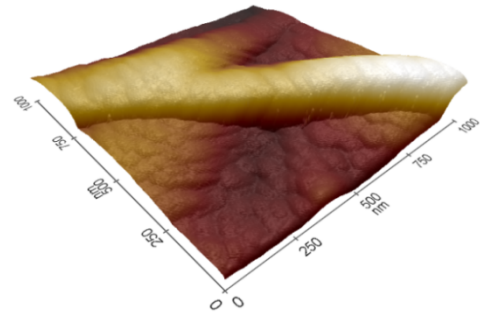
Şekil 2.67. Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



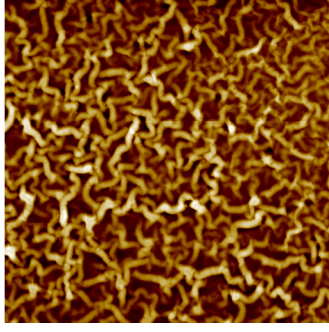
Şekil 2.70. Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



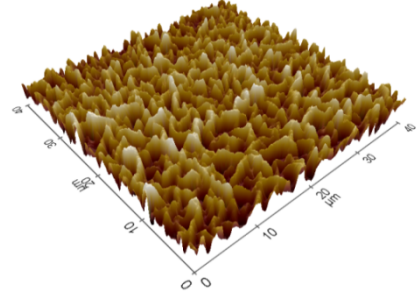
Şekil 2.68. Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



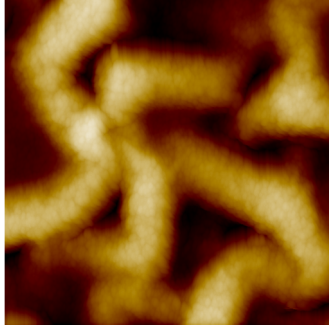
Şekil 2.71. Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



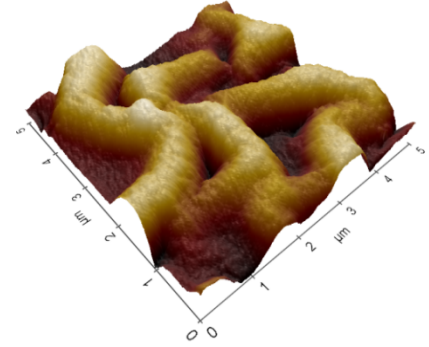
Şekil 2.72. %0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



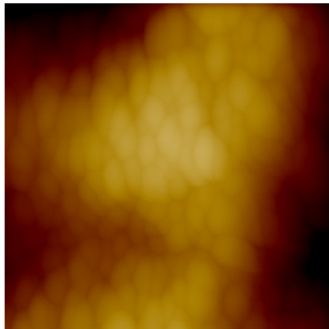
Şekil 2.75. %0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



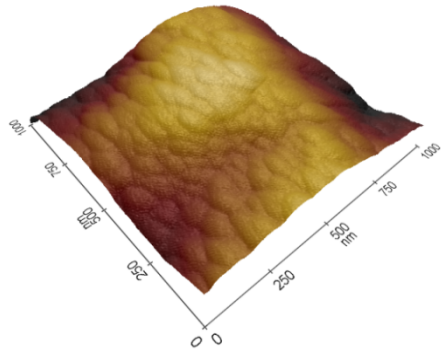
Şekil 2.73. %0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



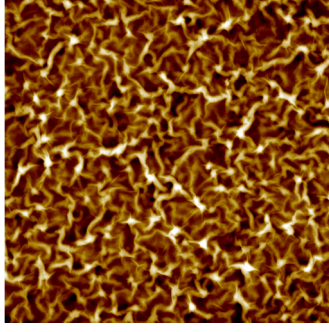
Şekil 2.76. %0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



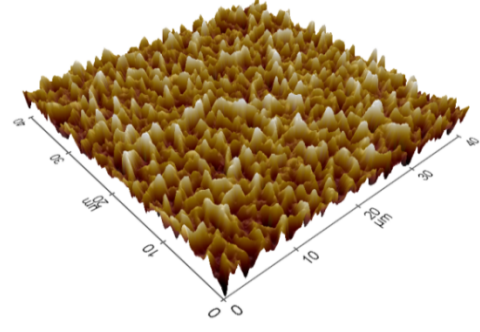
Şekil 2.74. %0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



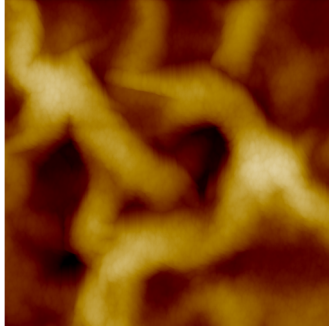
Şekil 2.77. %0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



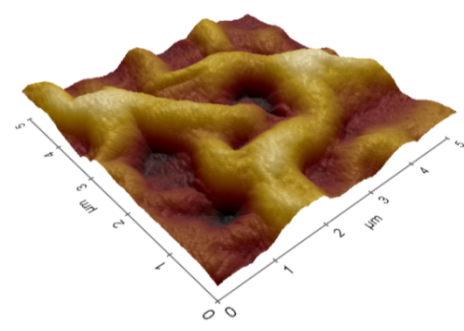
Şekil 2.78. %0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



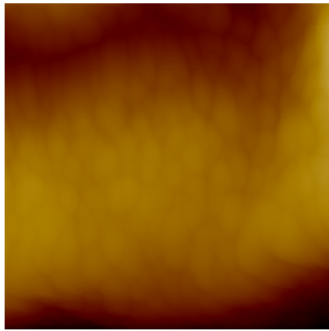
Şekil 2.81. %0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



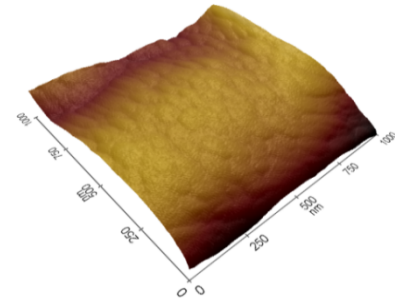
Şekil 2.79. %0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



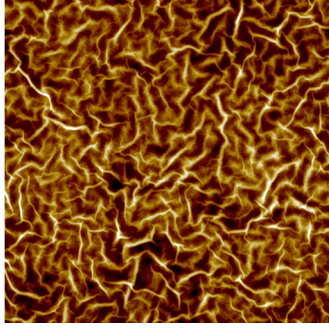
Şekil 2.82. %0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



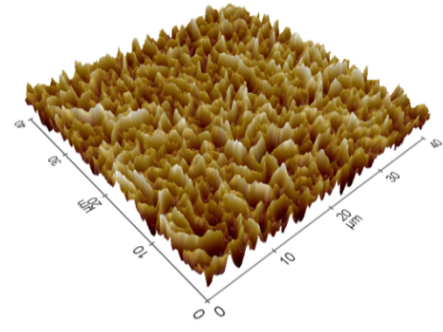
Şekil 2.80. %0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



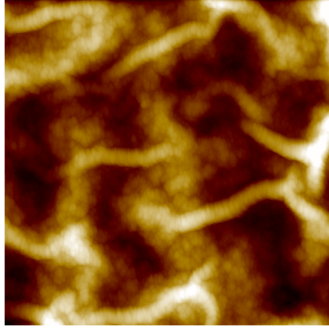
Şekil 2.83. %0,5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



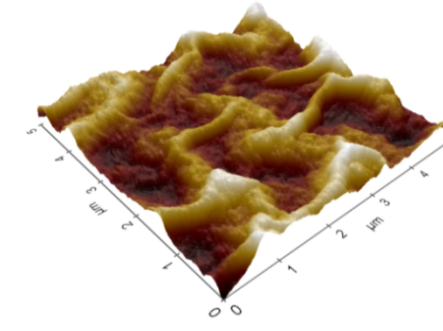
Şekil 2.84. % 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



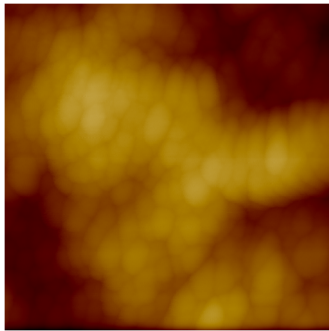
Şekil 2.87. % 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



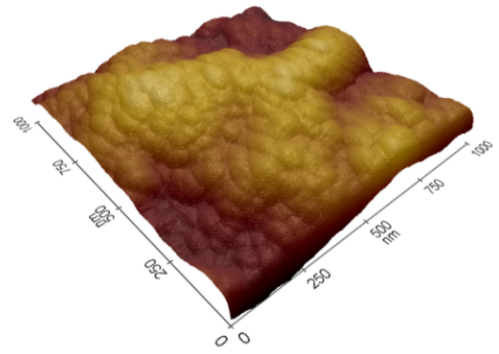
Şekil 2.85. % 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



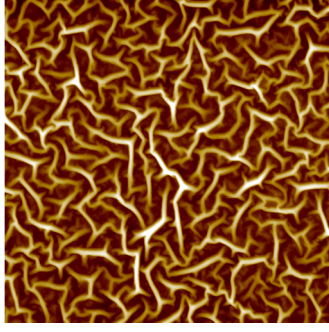
Şekil 2.88. % 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



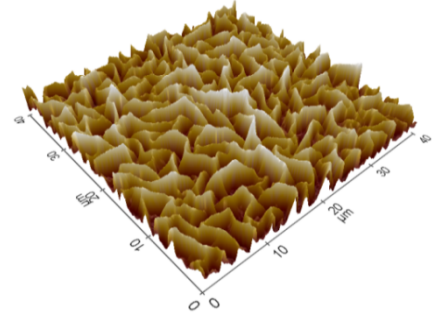
Şekil 2.86. % 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



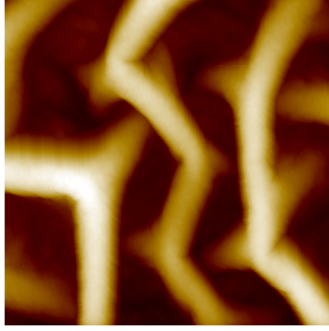
Şekil 2.89. % 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



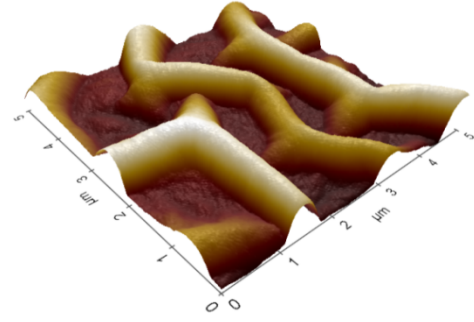
Şekil 2.90. % 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



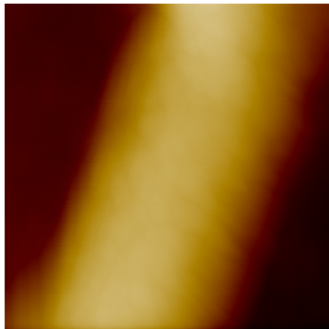
Şekil 2.93. % 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



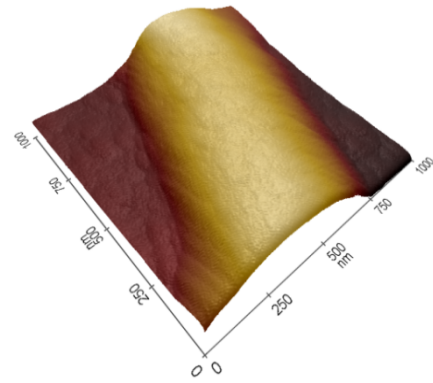
Şekil 2.91. % 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



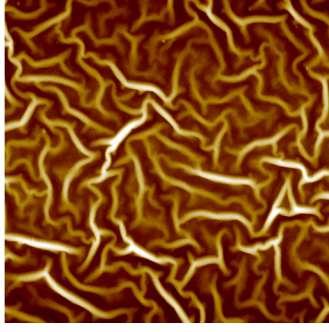
Şekil 2.94. % 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



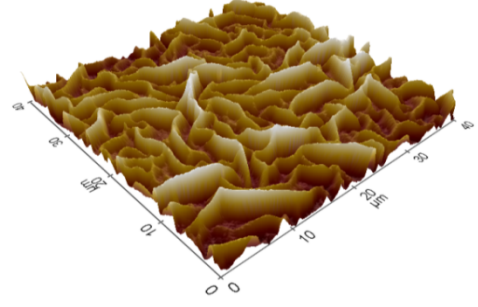
Şekil 2.92. % 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



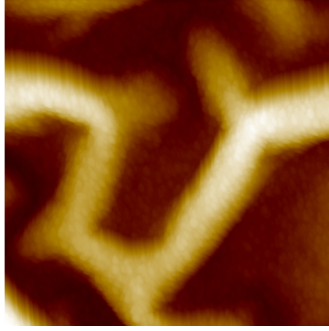
Şekil 2.95. % 2at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



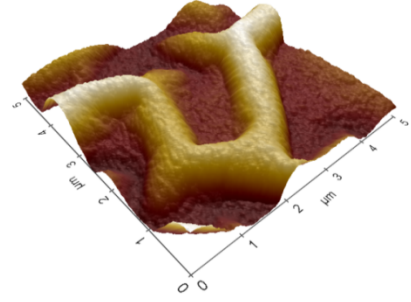
Şekil 2.96. % 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



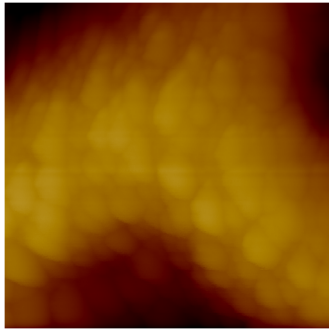
Şekil 2.99. % 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



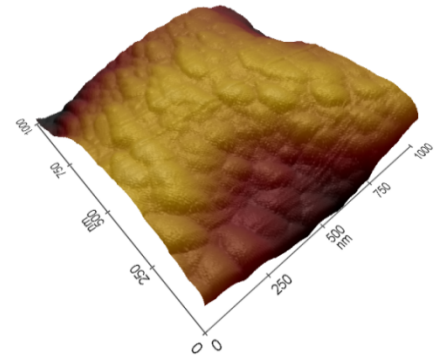
Şekil 2.97. % 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 2.100. % 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü

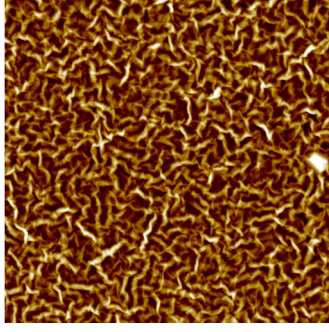


Şekil 2.98. % 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü

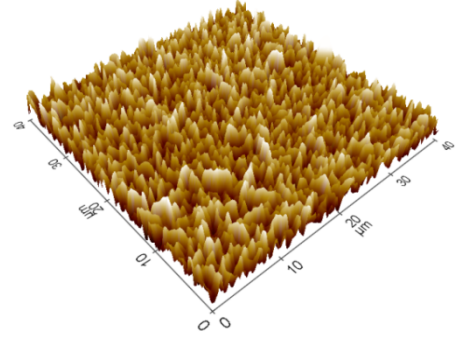


Şekil 2.101. % 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü

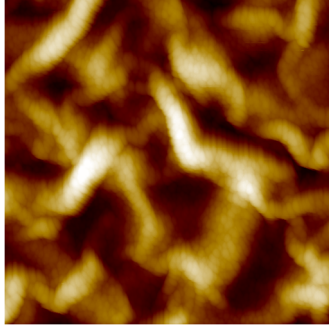
Sn katkılı ZnO numuneleri için alınan AFM görüntüleri şekil 2.102-2.137'de verilmiştir. % 1at. Sn ilavesine kadar tane büyüklüğünde bir düşüş gözlenmiş olmasına rağmen artan Sn ilavesi ile ortalama tane büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde ise katkı miktarının artması başta pürüzlülükte bir düşüşe sebep olsa da % 2at. Sn ilavesi ile maksimum değere çıktığı görülmüştür.



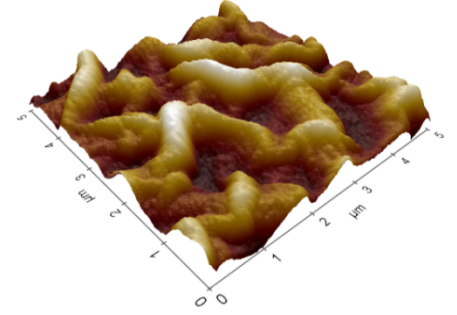
Şekil 2.102. Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



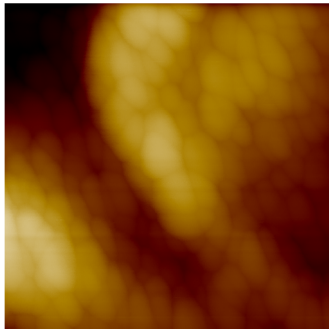
Şekil 2.105. Katkısız ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



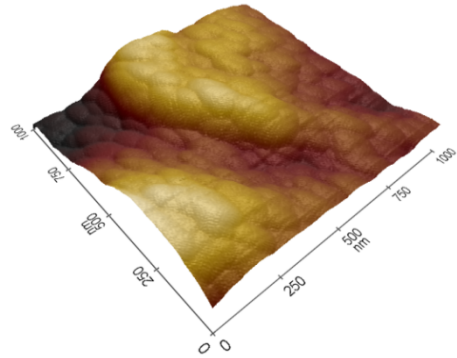
Şekil 2.103. Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



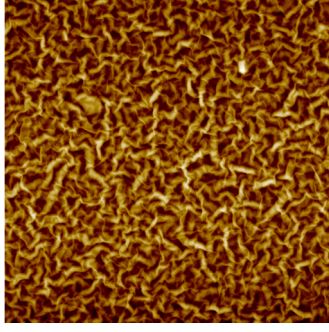
Şekil 2.106. Katkısız ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



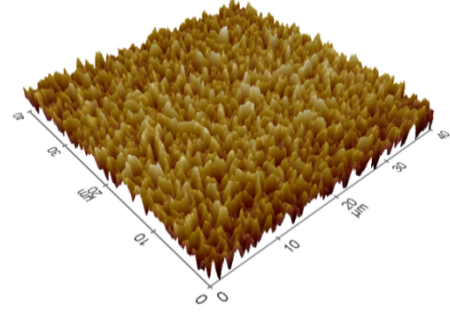
Şekil 2.104. Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



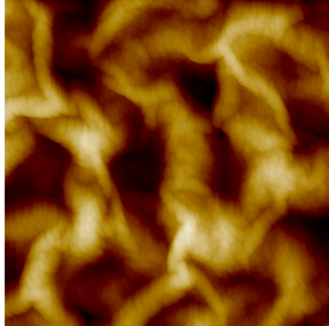
Şekil 2.107. Katkısız ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



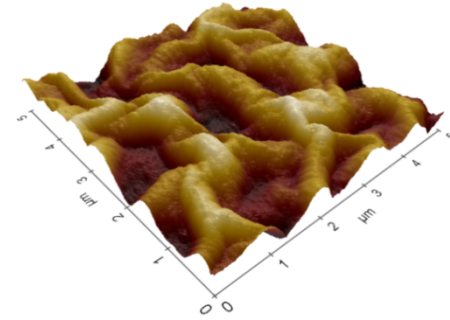
Şekil 2.108. %0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



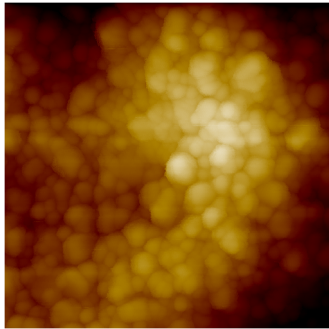
Şekil 2.111. %0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



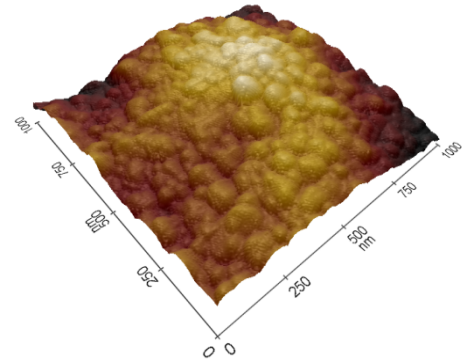
Şekil 2.109. %0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



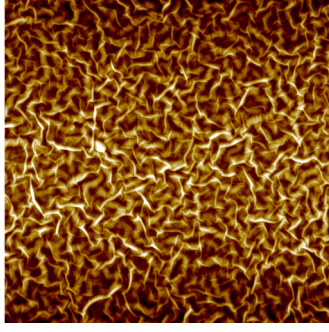
Şekil 2.112. %0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



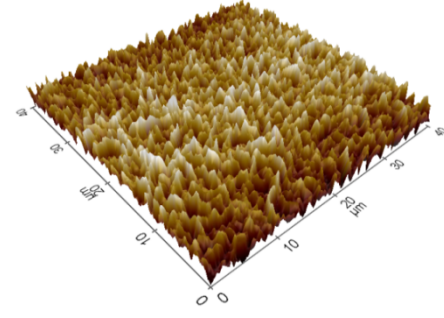
Şekil 2.110. %0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



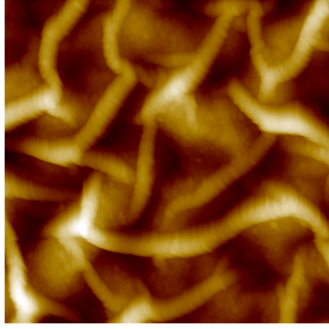
Şekil 2.113. %0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



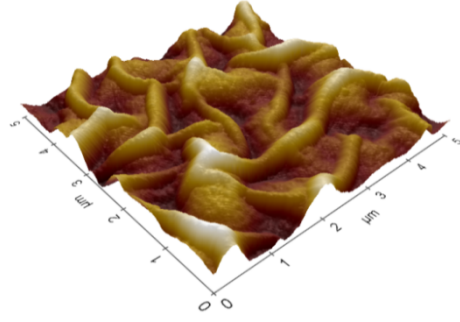
Şekil 2.114. %0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



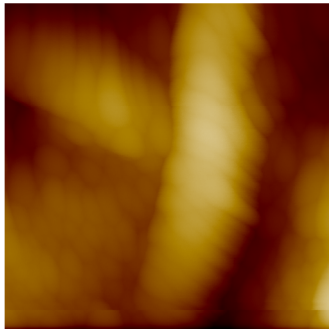
Şekil 2.117. %0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



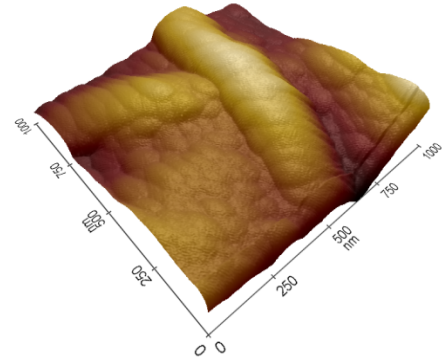
Şekil 2.115. %0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



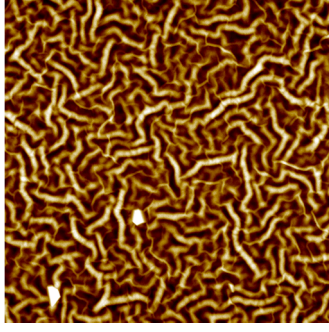
Şekil 2.118. %0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



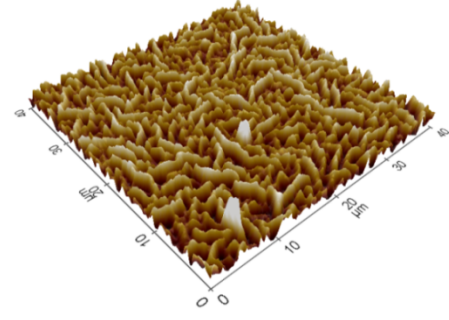
Şekil 2.116. %0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



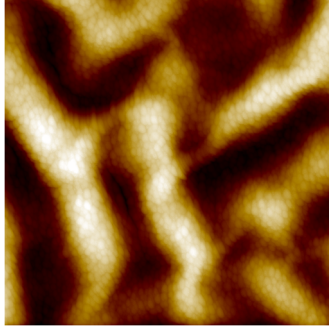
Şekil 2.119. %0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



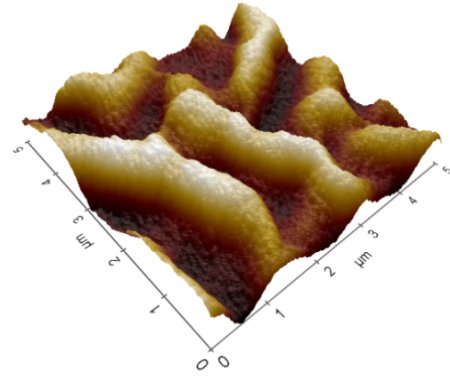
Şekil 2.120. % 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin 40 μ x40 μ 2 boyutlu AFM görüntüsü



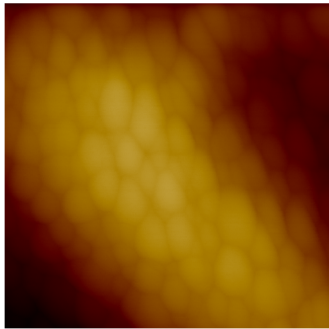
Şekil 2.123. % 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin 40 μ x40 μ 3 boyutlu AFM görüntüsü



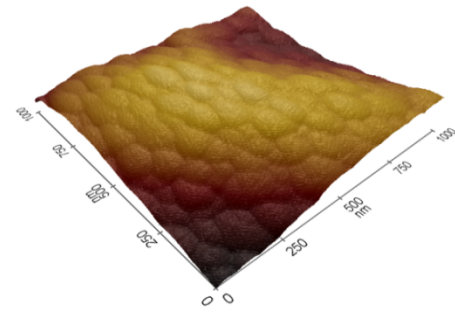
Şekil 2.121. % 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin 5 μ x5 μ 2 boyutlu AFM görüntüsü



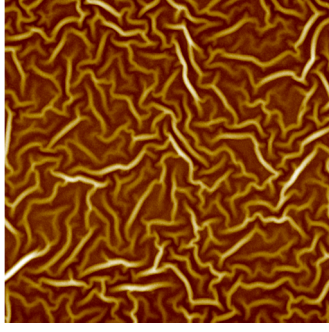
Şekil 2.124. % 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin 5 μ x5 μ 3 boyutlu AFM görüntüsü



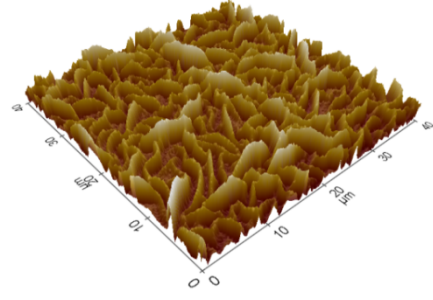
Şekil 2.122. % 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin 1 μ x1 μ 2 boyutlu AFM görüntüsü



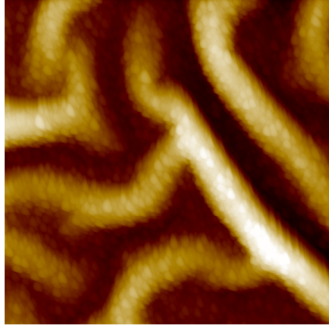
Şekil 2.125. % 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin 1 μ x1 μ 3 boyutlu AFM görüntüsü



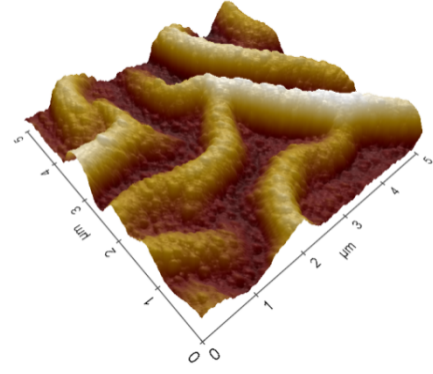
Şekil 2.126. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



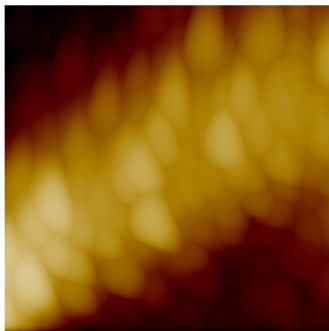
Şekil 2.129. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



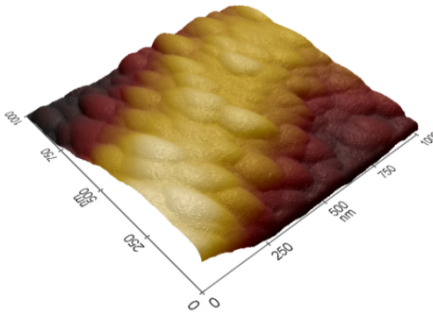
Şekil 2.127. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



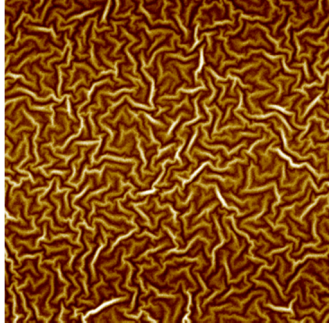
Şekil 2.130. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



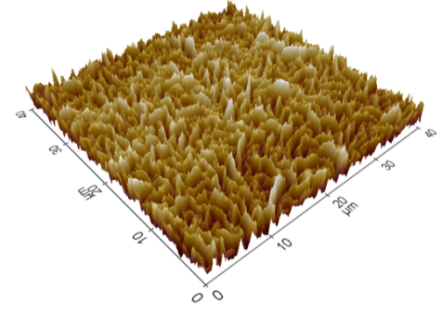
Şekil 2.128. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



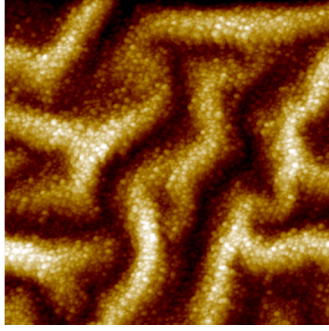
Şekil 2.131. % 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



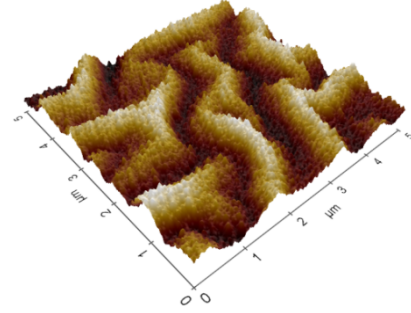
Şekil 2.132. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



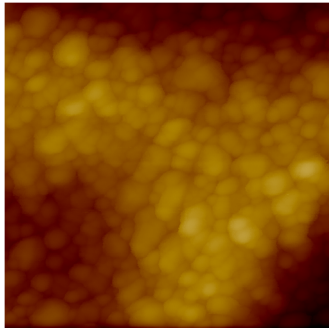
Şekil 2.135. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $40\mu\text{x}40\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



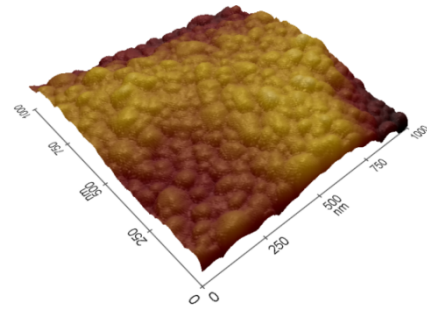
Şekil 2.133. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 2.136. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $5\mu\text{x}5\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 2.134. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 2 boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 2.137. % 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin $1\mu\text{x}1\mu$ 3 boyutlu AFM görüntüsü

Her bir numune yüzeyinde taranan bölgelerdeki tanelerin ortalama alanları, hacimleri ve büyüklükleri hesaplanmıştır. Bu değerler tablo 2.22, tablo 2.23 ve tablo 2.24’de verilmiştir.

Tablo 2.22. Al katkılı ZnO numunelerin AFM’de ölçülen tanelerin ortalama değerleri

Numune	Tanelerin Ortalama Alanı(μm^2)	Tanelerin Ortalama Hacmi(μm^3)	Tanelerin Ortalama Boyutu(nm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)
Katkısız ZnO	$1,369 \times 10^{-3}$	$4,454 \times 10^{-5}$	54,961	30,087
% 0,1at. Al Katkılı ZnO	$7,044 \times 10^{-4}$	$1,729 \times 10^{-5}$	39,843	37,862
% 0,5at. Al Katkılı ZnO	$1,055 \times 10^{-3}$	$3,267 \times 10^{-5}$	47,703	36,826
% 1at. Al Katkılı ZnO	$1,126 \times 10^{-3}$	$1,607 \times 10^{-5}$	49,293	36,767
% 2at. Al Katkılı ZnO	$1,15 \times 10^{-3}$	$3,675 \times 10^{-5}$	51,823	34,806
% 5at. Al Katkılı ZnO	$1,997 \times 10^{-3}$	$3,932 \times 10^{-5}$	67,486	94,562

Tablo 2.23. Cu katkılı ZnO numunelerin AFM’de ölçülen tanelerin ortalama değerleri

Numune	Tanelerin Ortalama Alanı(μm^2)	Tanelerin Ortalama Hacmi(μm^3)	Tanelerin Ortalama Boyutu(nm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)
Katkısız ZnO	$1,714 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-4}$	64,007	114,807
% 0,1at. Cu Katkılı ZnO	$1,469 \times 10^{-3}$	$6,092 \times 10^{-5}$	59,051	139,073
% 0,5at. Cu Katkılı ZnO	$1,328 \times 10^{-3}$	$6,893 \times 10^{-5}$	55,577	110,780
% 1at. Cu Katkılı ZnO	$1,26 \times 10^{-3}$	$2,59 \times 10^{-5}$	52,084	70,042
% 2at. Cu Katkılı ZnO	$1,799 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-4}$	66,059	152,456
% 5at. Cu Katkılı ZnO	$1,849 \times 10^{-3}$	$8,297 \times 10^{-5}$	64,760	144,943

Tablo 2.24. Sn katkılı ZnO numunelerin AFM’de ölçülen tanelerin ortalama değerleri

Numune	Tanelerin Ortalama Alanı(μm^2)	Tanelerin Ortalama Hacmi(μm^3)	Tanelerin Ortalama Boyutu(nm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)
Katkısız ZnO	$1,172 \times 10^{-3}$	$3,794 \times 10^{-5}$	50,927	102,926
% 0,1at. Sn Katkılı ZnO	$1,223 \times 10^{-3}$	$3,434 \times 10^{-5}$	52,361	115,250
% 0,5at. Sn Katkılı ZnO	$9,111 \times 10^{-4}$	$4,019 \times 10^{-5}$	45,950	110,600
% 1at. Sn Katkılı ZnO	$6,797 \times 10^{-4}$	$3,242 \times 10^{-5}$	39,234	94,439
% 2at. Sn Katkılı ZnO	$2,34 \times 10^{-3}$	$1,049 \times 10^{-4}$	71,844	179,616
% 5at. Sn Katkılı ZnO	$1,61 \times 10^{-3}$	$4,716 \times 10^{-5}$	60,044	139,521

2.5. Optik Özellikler

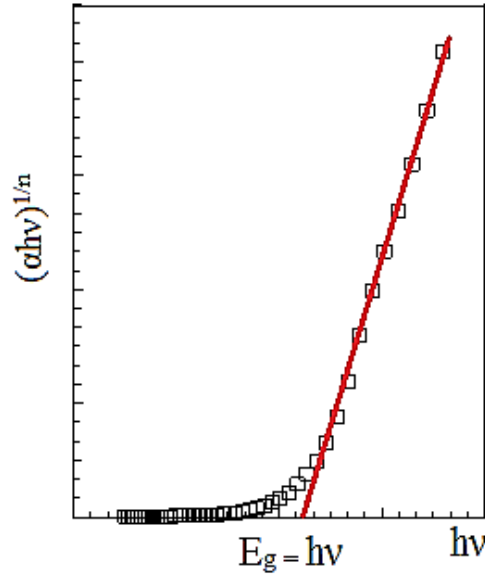
Optik yöntemde, yarıiletkenin temel absorpsiyon spektrumundan yararlanarak yasak enerji aralığı belirlenir. Bunun için absorpsiyon katsayısı ile yasak enerji aralığı arasındaki bağıntı,

$$\alpha(h\nu) \approx (h\nu - E_g)^n \quad (2.3)$$

denkleminin her iki tarafının $1/n$ 'inci üssü alınır,

$$(\alpha h\nu)^{1/n} \approx (h\nu - E_g) \quad (2.4)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı gerek yarıiletkenin band türünün belirlenmesinde gerekse yasak enerji aralığının belirlenmesinde kullanılır. Yarıiletkenin band türü belirlenirken $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^{1/n}$ grafikleri, doğrudan ve dolaylı izinli geçiş için 1/2 ve 2 olan n değeri yerine konularak çizilir. Grafiklerde doğrusal bölgelere bakılır. En doğrusal bölge hangisinde elde ediliyorsa n 'in değerine bakılıp band türünün doğrudan veya dolaylı olduğu belirlenir. Band aralığı belirlenirken ise şekil 2.138'deki gibi $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^{1/n}$ grafiği çizilir. Elde edilen grafiğin lineer kısmının $h\nu$ 'yü, $(\alpha h\nu)^{1/n} = 0$ 'da kestiği nokta yasak enerji aralığını verir [3,13,44,57].



Şekil 2.138. Bir yarıiletkende absorpsiyon katsayısının fotonun enerjisine göre değişiminden, yasak enerji aralığının belirlenmesi [3].

Üzerine ışın gönderilen madde bir yarıiletken ise fotonlar malzeme ile etkileşerek absorpsiyon, kırılma, yansıma ve geçirme gibi birçok optik olay meydana gelir [10,37,59].

Yarıiletken üzerine gönderilen fotonun enerjisi yasak enerji aralığına denk veya daha büyük ise elektron fotonun enerjisini alarak ya doğrudan ya da dolaylı olarak valans bandından iletim bandına geçer. Bu olay yarıiletkenlerde absorpsiyon olarak adlandırılır. Malzemenin absorpsiyon katsayısı

$$\alpha = 2,303 \frac{\log(1/T)}{t} \quad (2.5)$$

eşitliği ile verilir. Burada T, geçirgenliği; t, yarıiletken malzemenin kalınlığını ifade etmektedir [8,51,59,60].

Malzeme üzerine gönderilen fotonun enerjisi elektronu iletim bandına çıkaramayacak kadar az ise malzeme fotonu soğuramaz ve malzeme foton için saydam davranır. Bu olaya ışını geçirme denir. Geçirgenlik T ile gösterilir. Bir fotonun soğurulması veya geçirilmesi fotonun enerjisine, yarıiletkenin yasak enerji aralığına ve atomların veya molekül gruplarının dizilişine bağlıdır [10,37,58].

Geçirgenlik, numuneyi geçen ışının şiddetinin numuneye gelen ışının şiddetine oranı olarak tanımlanır ve

$$T = I/I_0 \quad (2.6)$$

eşitliği ile verilir. Geçirgenlik ve absorbans (A) arasındaki ilişki ise

$$A = -\log T \quad (2.7)$$

eşitliği ile verilir. Numunenin absorpsiyon spektrumundan

$$T = 10^{-A} \quad (2.8)$$

eşitliği ile geçirgenlik bulunabilir ve dalga boyuna karşı grafiği çizilebilir [10].

Malzeme ile fotonun bir etkileşmesi de 'yansıma'dır. Yansıma malzeme yüzeyinden yansıyan ışının şiddetinin malzeme yüzeyine gelen ışının şiddetine oranı olarak tanımlanır ve R ile gösterilir [17,10,61]. Malzeme yüzeyi düz ve gelen fotonların enerjisi yasak enerji aralığından düşükse gelen fotonların bir kısmı yüzeyden yansıtılır. Malzeme üzerine gönderilen ışının, soğurulma, geçirilme ve yansıtılma süreci şekil 2.139'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi malzemeyi geçen ışının şiddeti

$$I = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha t} \quad (2.9)$$

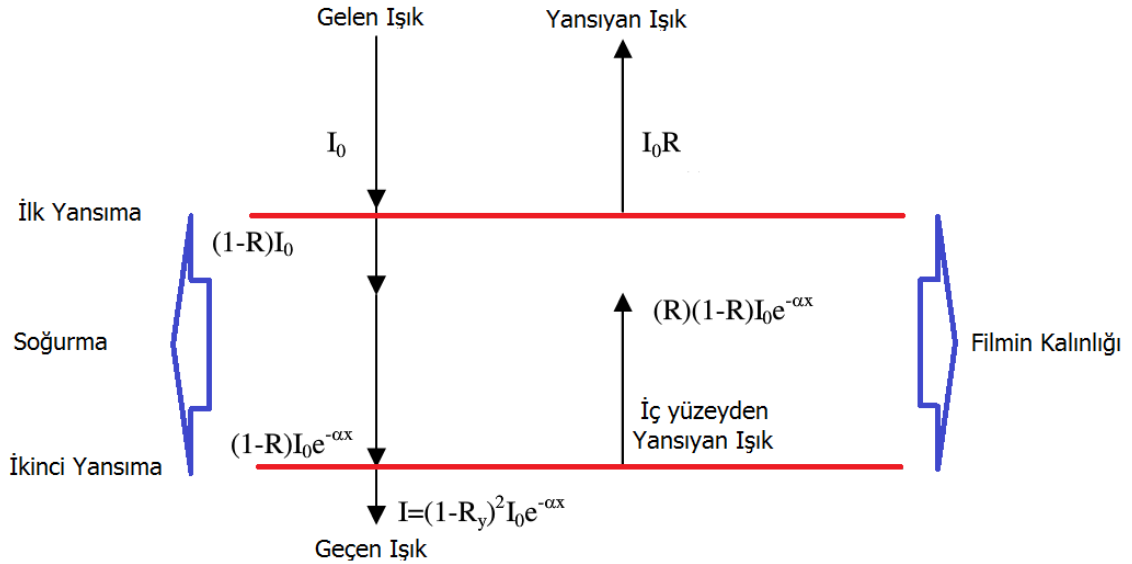
ile gösterilmiştir. Geçirgenlik, absorbans ve yansımaya katsayısı arasındaki bağıntı ise

$$T = (1 - R)^2 e^{-A} \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Denklem (2.10)'dan faydalanılarak

$$R = 1 - \sqrt{10^{-A} e^A} \quad (2.11)$$

eşitliği elde edilir [10]. Bu eşitlik bize absorbans ölçümünden faydalanılarak yansımaya katsayısının bulunma olasılığını verir.



Şekil 2.139. Işının materyale dik gelmesi durumunda soğurulma, geçirilme ve yansımaya süreci [12].

Absorbans katsayısının yansımaya katsayısı R ve geçirgenlik katsayısı T'ye bağımlılığı

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \left[\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.12)$$

eşitliği ile verilir.

Işının malzeme ile etkileşmesinden biriside kırılmadır. Kırılma ışının malzemeye dik gelmediği durumlarda malzeme içine geçerken veya daha genel anlamda ışının

ortam değiştirirken yn değiştirmesidir. Yarıiletken bir malzeme için kompleks kırılma indisi (n^*)

$$n^* = n - ik \quad (2.13)$$

eşitliği ile verilir.

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (2.14)$$

eşitliği kırılma indisinin gerçel kısmı olup, kırılma indisini verir [10].

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (2.15)$$

eşitliği ise kırılma indisinin sanal kısmı olup sönüm katsayısı olarak ifade edilir [10,60,62-64].

Malzemenin kırılma indisi dalga boyunun bir fonksiyonudur. Yüksek kırılma indisine sahip malzemeler daha fazla yansıtma özelliğine sahiptirler. Atom numarası arttığında elektron sayısı da artacağından ve kutuplaşma oğalacağından fotonlar daha fazla etkilenir ve fazla kırılmaya uğrarlar. Bu nedenle malzemenin kırılma indisi ve dielektrik sabiti arasında bir ilişki vardır. Bir malzeme için kompleks dielektrik sabiti ϵ ,

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.16)$$

eşitliği ile verilebilir. Ancak malzemenin dielektrik sabiti doğrudan ölçülemez. Doğrudan ancak optik ölçümlerle yansıtma katsayısı R, kırılma indisi n ve sönüm katsayısı k ölçülebilir. Dielektrik sabiti ve kırılma indisi arasında

$$n = \sqrt{\epsilon} \quad (2.17)$$

ilişkisi bulunmaktadır. Dielektrik sabitinin gerçel kısmı,

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.18)$$

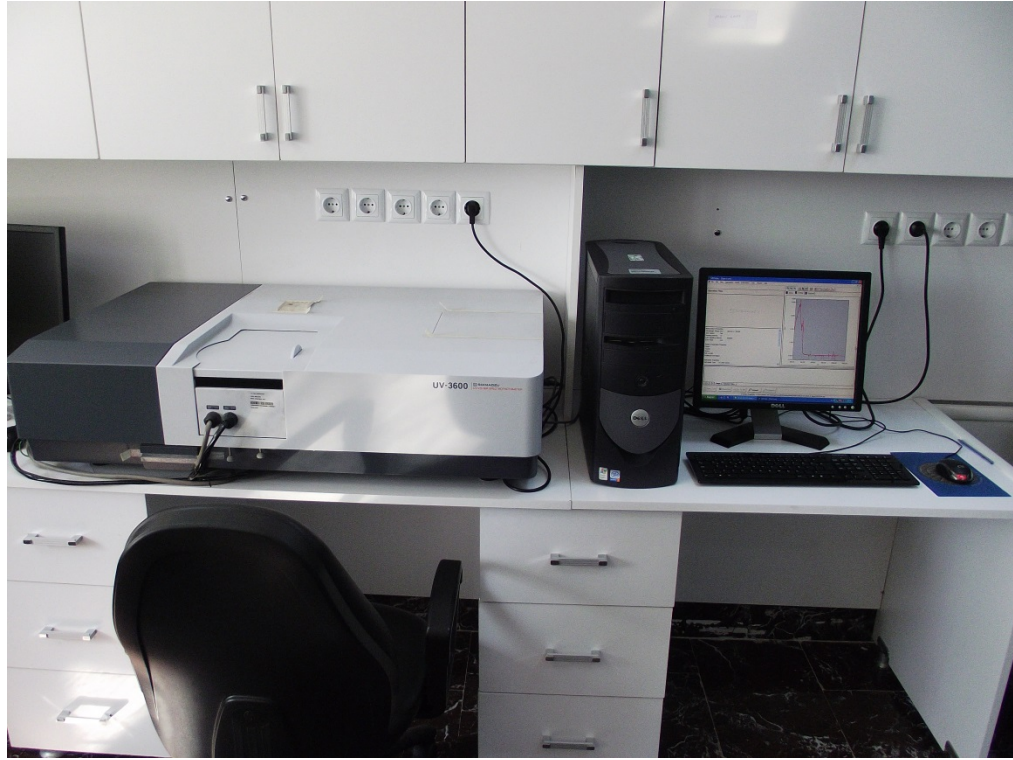
ve sanal kısmı,

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (2.19)$$

eşitlikleri ile verilmektedir [10,17,40].

Herhangi bir yarıiletkende, kristalde veya amorf yapıda band bükümleri enerji band aralığında daralmalara neden olur [10].

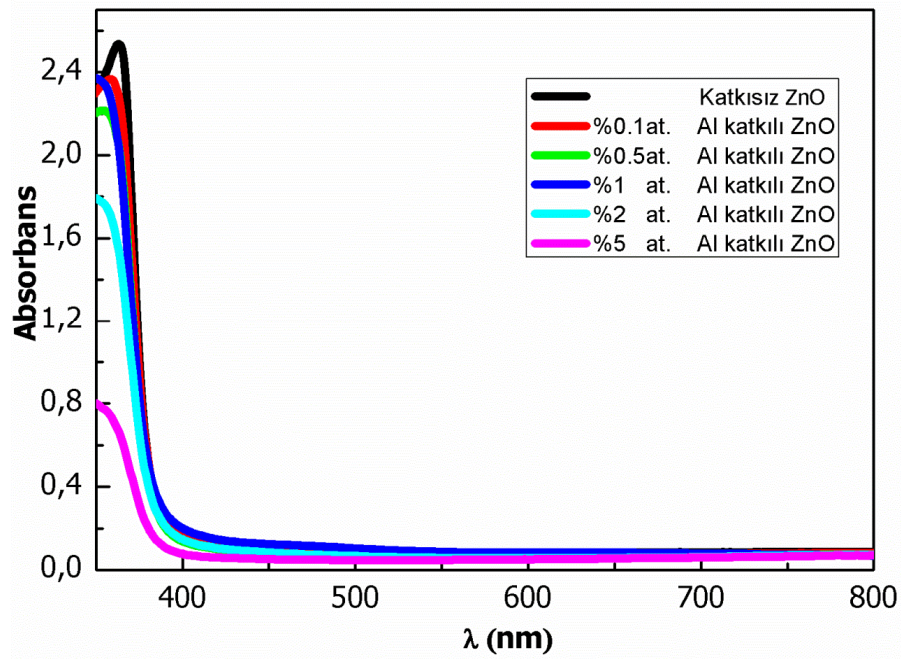
Sol-jel yöntemi ile katkısız ve farklı oranlarda Al, Sn ve Cu katkılı ZnO ince filmler hazırlandı. Hazırlanan ince filmlerin UV ölçümleri şekil 2.140'da görülen UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spektrofotometre cihazı ile yapıldı.



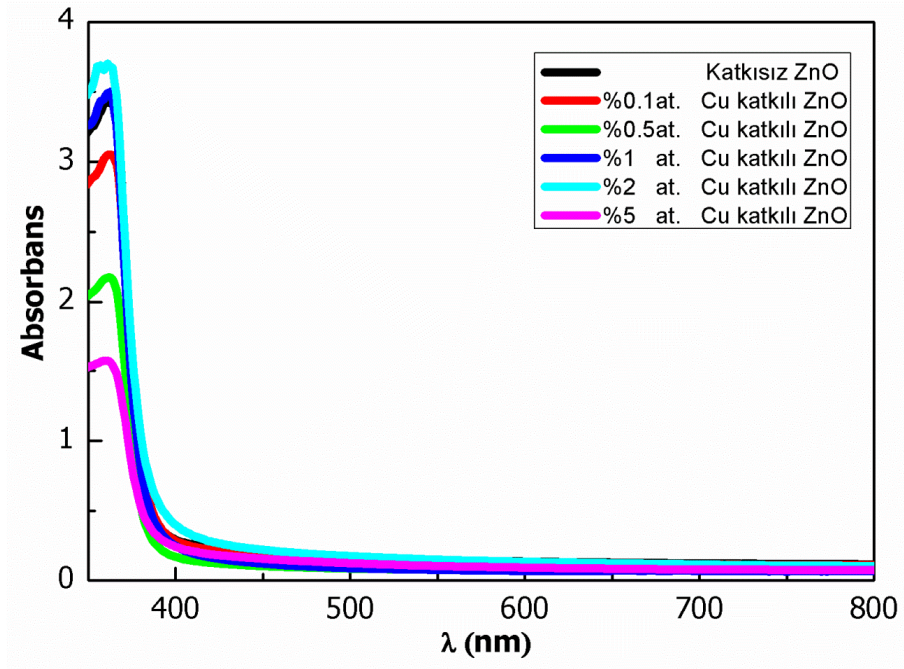
Şekil 2.140. Optik ölçümler için kullanılan spektrofotometre

Hazırlanan ince filmlerin soğurma (absorbans) A, geçirgenlik T spektrumları oda sıcaklığında 350-800 nm dalga boyu aralığında alındı. Al, Sn ve Cu katkılı ZnO ince filmleri için çizilen A,T ve R grafikleri aşağıda gösterildi.

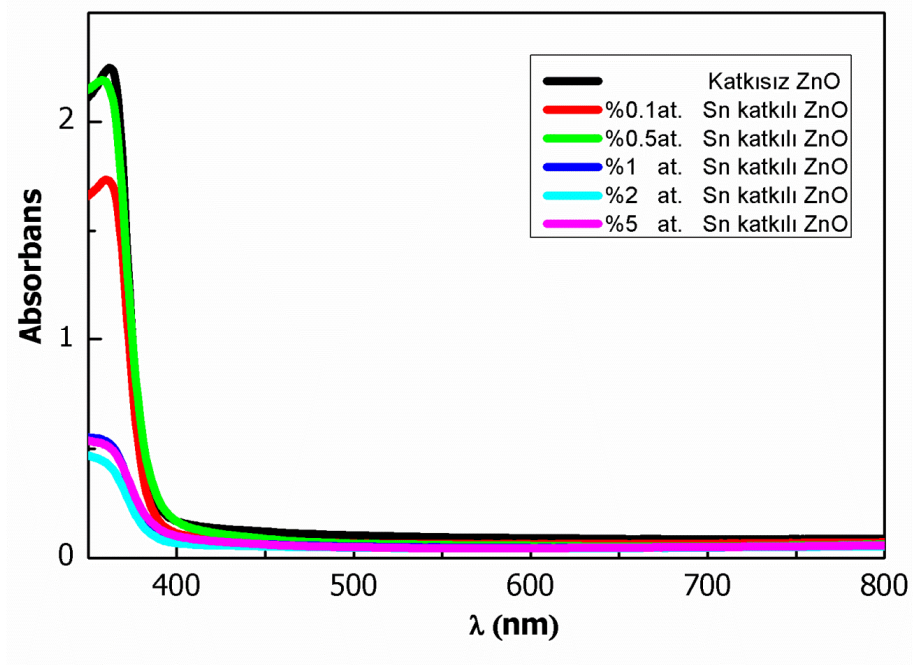
Şekil 2.141,2.142,2.143'de görüldüğü gibi Al, Cu ve Sn katkılı ZnO ince filmlerin soğurma spektrumunda 400 nm dalga boyuna yakın dalga boylarında, absorpsiyonda sürekli bir artış gözlenmektedir. 400 nm dalga boyundan sonra, absorpsiyon bir denge değerine ulaşmaktadır. Bu nedenle yarıiletken materyal, 400 nm dalga boyundan büyük dalga boylarında absorblama yapmadığından hemen hemen geçirgen özellik göstermektedir. 400 nm dalga boylarından küçük dalga boylarında ise kuvvetli absorblayıcı özellik göstermektedir.



Şekil 2.141. Katkısız ve Al katkılı ZnO ince filmlerin absorbans spektrumları



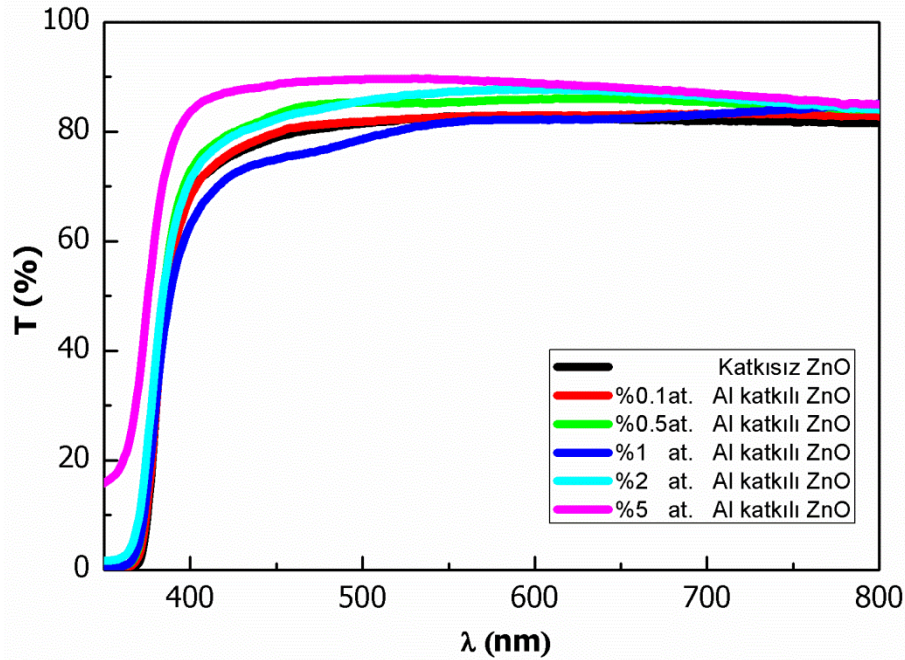
Şekil 2.142. Katkısız ve Cu katkılı ZnO ince filmlerin absorbanans spektrumları



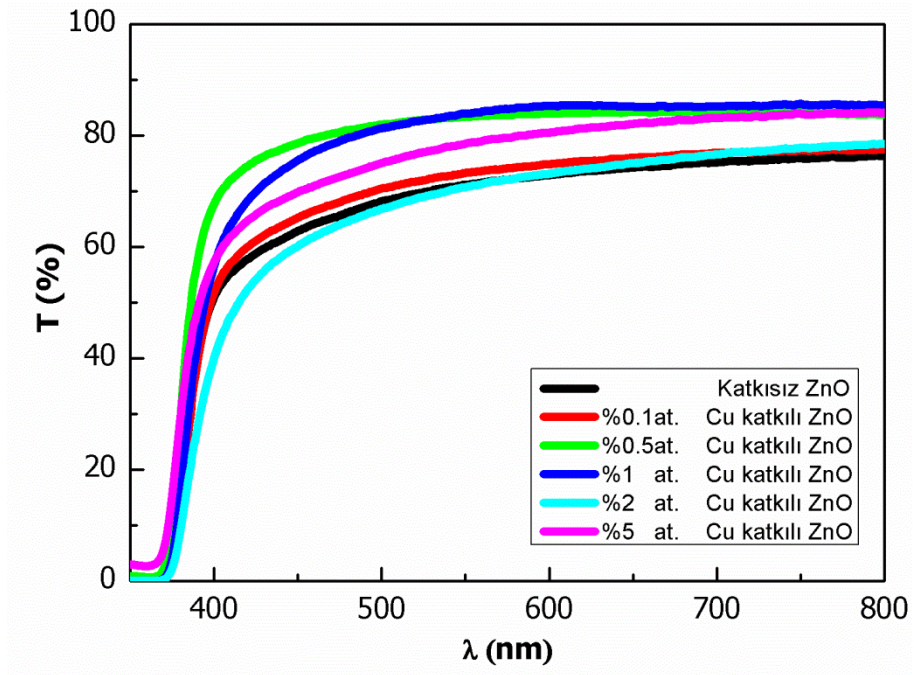
Şekil 2.143. Katkısız ve Sn katkılı ZnO ince filmlerin absorbanans spektrumları

Şekil 2.144,2.145,2.146’da Al, Cu ve Sn ince filmlerin geçirgenlik spektrumunda 400-450 nm arasındaki dalgalarda keskin bir soğurma kıyası görülmektedir. Filmleri büyük bir çoğunluğu görünür bölgede % 80’nin üzerinde geçirgenlik göstermiştir. Literatürde yapılan birçok çalışmada gerek katkılı gerekse katkısız ZnO ince filmi için benzer sonuçlara ulaşılmıştır [32,65]. Bu bakımdan ZnO iyi bir saydam iletkenidir [19].

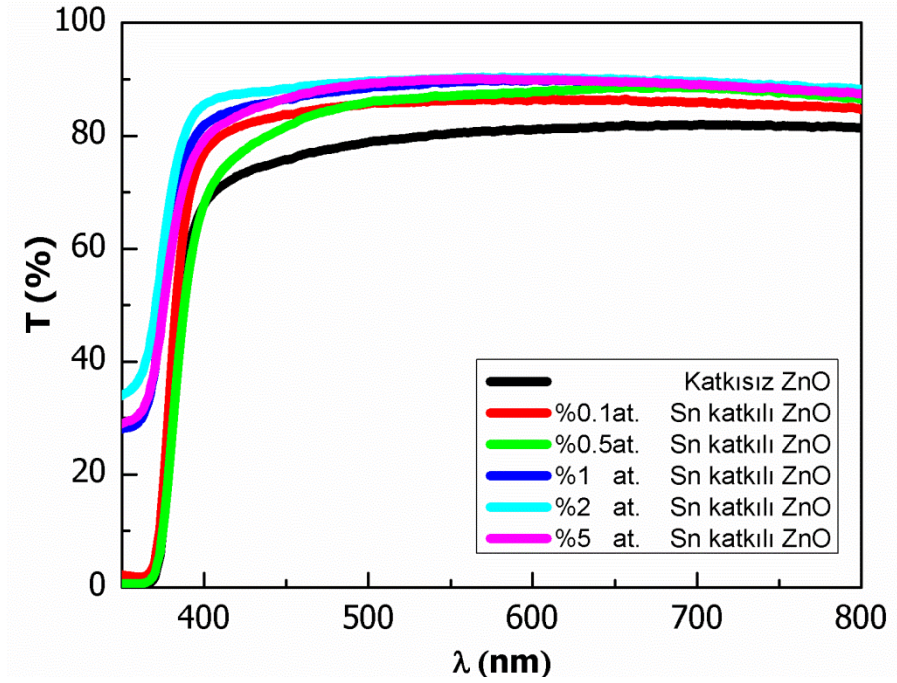
Katkısız ve katkılı ZnO filmleri için dalga boyu 800 nm den başlayıp 300 nm ye kadar azalmıştır. Bu da fotonların enerjilerinin yarıiletken materyalin enerji band aralığına denk veya daha fazla olduğu durumlarda ve bunun sonucu olarak valans iletken bandları arasında elektron transferinin gerçekleşmesiyle materyalin daha fazla absorplama yaptığını göstermektedir. Geçirgenliğin kısa dalga boylarında ani bir düşüş göstermesinin sebebinin bundan kaynaklandığı düşünülmektedir [10]. Filmlerin optik geçirgenlik ölçümlerinde oluşan dalgalanmalar ise hava ile ZnO ince film ve ZnO ince filmle altlık ara yüzeylerinde oluşan yansımaların girişimi sonucudur [19]. Şekillerde de görüldüğü gibi hazırlanmış ZnO ince filmler optik geçirgenliği büyük değerlerde başlayıp çok hızlı bir düşüş göstermiştir.



Şekil 2.144. Katkısız ve Al katkılı ZnO numunelerin geçirgenlik spektrumları



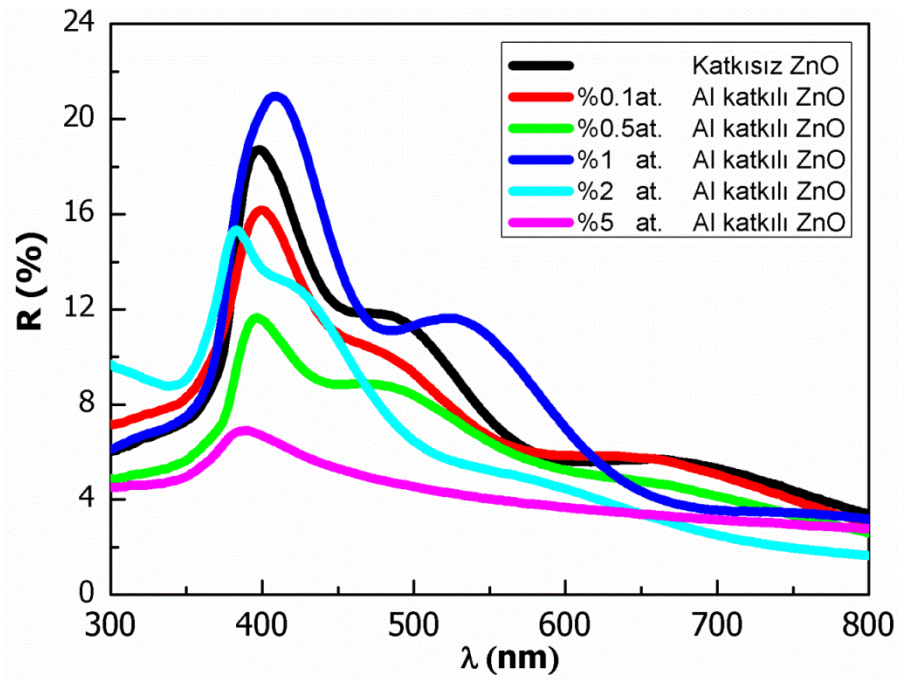
Şekil 2.145. Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunelerin geçirgenlik spektrumları



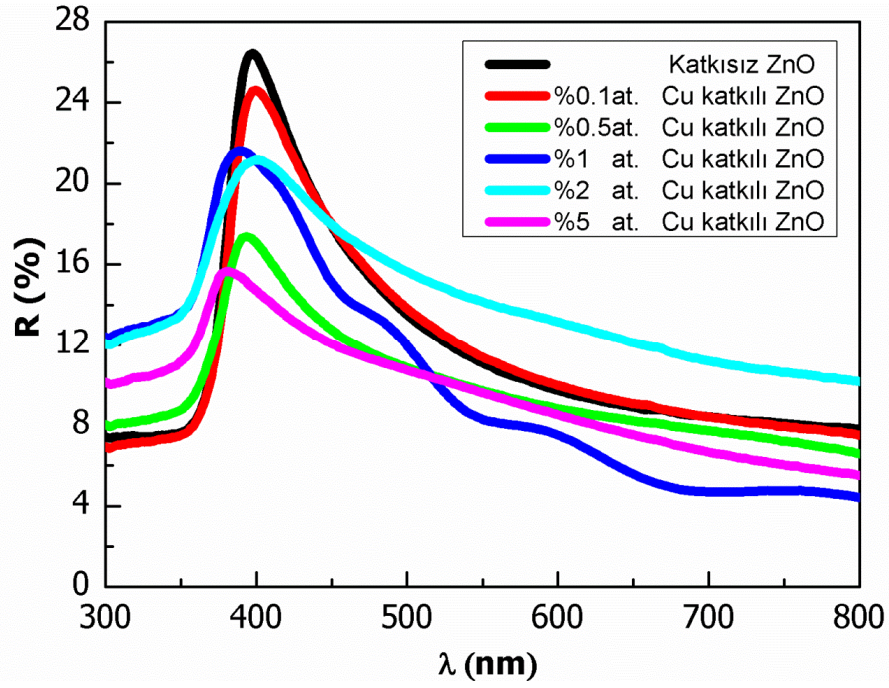
Şekil 2.146. Katkısız ve Sn katkılı ZnO numunelerin geçirgenlik spektrumları

Şekil 2.147,2.148,2.149’da katkısız ve Al, Cu ve Sn katkılı ZnO numunelerin yansımaya spektrumları verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi numunelerin yansımaya eğrileri yaklaşık 400 nm dalga boyu civarında bir pik göstermektedir. Bu pik katkı ile değiştiği görülmektedir. Böylece filmlerin yasak enerji aralıklarının Al, Cu ve Sn katkı maddeleriyle değiştiğini doğrulamaktadır.

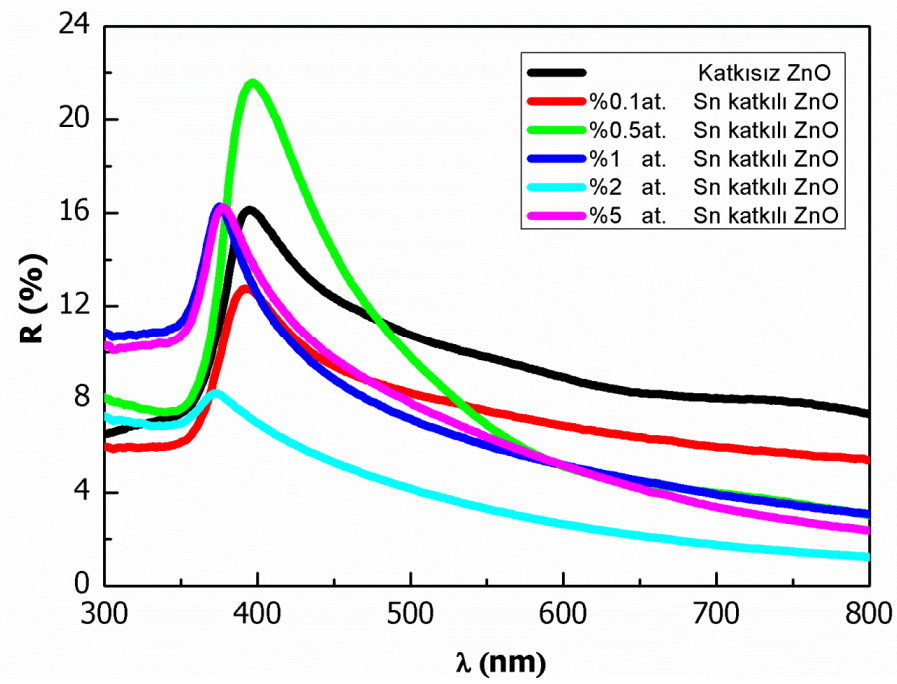
Yansımaya kısa dalgaboylarına kaydıkça artmıştır. Bunun sebebinin fotonların enerjisinin artışından dolayı, fotonların elektronlar, atomlar veya kristal molekülleriyle daha fazla etkileştikleri ve geri yansydıkları düşünülmektedir [10].



Şekil 2.147. Katkısız ve Al katkılı ZnO numunelerin yansımaya spektrumları

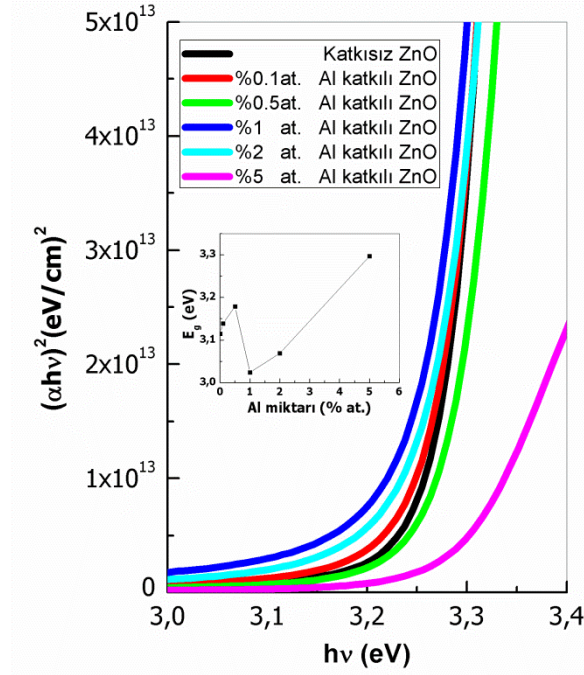


Şekil 2.148. Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunelerin yansımaları

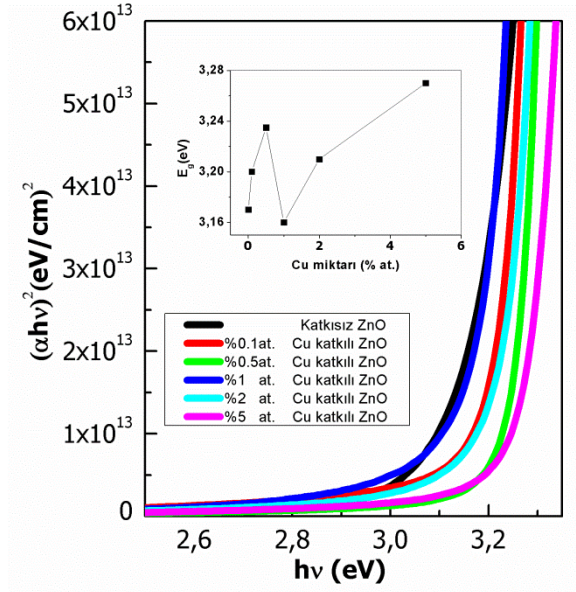


Şekil 2.149. Katkısız ve Sn katkılı ZnO numunelerin yansımaları

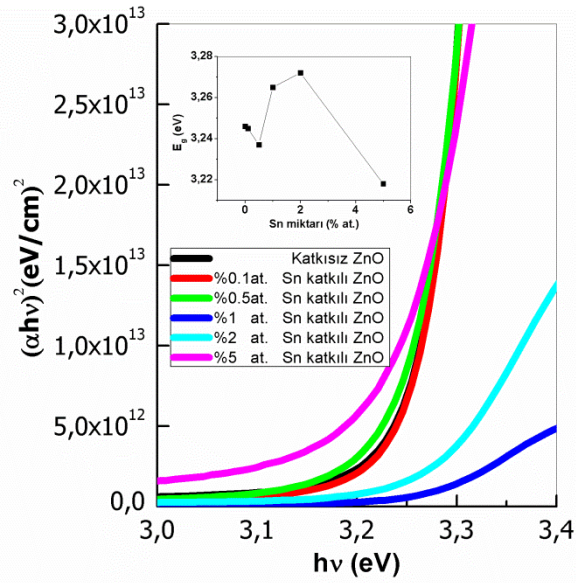
Şekil 2.150,2.151,2.152’de görüldüğü gibi çizilen $(\alpha hv)^2$ -E grafiklerinde hesaplanan E_g değerleri aynı grafiklerde de çizilmiştir ve hesaplanmış olan E_g değerleri tablo 2.25, tablo 2.26 ve tablo 2.27’de verilmiştir.



Şekil 2.150. Katkısız ve Al katkılı ZnO numunelerin $(\alpha hv)^2$ - $h\nu$ grafikleri



Şekil 2.151. Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunelerin $(\alpha hv)^2 - hv$ grafikleri



Şekil 2.152. Katkısız ve Sn katkılı ZnO numunelerin $(\alpha hv)^2 - hv$ grafikleri

Filmlerin yasak enerji aralıkları incelendiğinde üretim aşamasında farklı çözeltiler kullanılmasına rağmen yasak enerji aralıklarının birbirine yakın olduğu görüldü. Hesaplanan yasak enerji aralıkları literatürle uyum içerisindedir [65].

Tablo 2.25. Al katkılı ZnO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri

Numune	E_g (eV)
Katkısız ZnO	3,115 eV
% 0,1at. Al katkılı ZnO	3,139 eV
% 0,5at. Al katkılı ZnO	3,179 eV
% 1at. Al katkılı ZnO	3,024 eV
% 2at. Al katkılı ZnO	3,069 eV
% 5at. Al katkılı ZnO	3,297 eV

Tablo 2.26. Cu katkılı ZnO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri

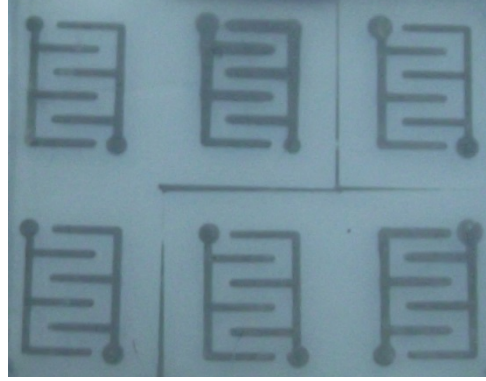
Numune	E_g (eV)
Katkısız ZnO	3,17 eV
% 0,1at. Cu katkılı ZnO	3,2 eV
% 0,5at. Cu katkılı ZnO	3,23 eV
% 1at. Cu katkılı ZnO	3,16 eV
% 2at. Cu katkılı ZnO	3,21 eV
% 5at. Cu katkılı ZnO	3,27 eV

Tablo 2.27. Sn katkılı ZnO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri

Numune	E_g (eV)
Katkısız ZnO	3,246 eV
% 0,1at. Sn katkılı ZnO	3,245 eV
% 0,5at. Sn katkılı ZnO	3,237 eV
% 1at. Sn katkılı ZnO	3,265 eV
% 2at. Sn katkılı ZnO	3,272 eV
% 5at. Sn katkılı ZnO	3,218 eV

2.6. Gaz Sensörlerin Hazırlanması ve Elektriksel Ölçümleri

Gaz ölçüm deneylerinde özellikle elde edilen filmlerin ve kontakların yüzey üzerindeki homojenliğinin, kalınlığının ve duyarlılığın en yüksek noktada olması istenen bir durumdur [56]. Bu sebepten dolayı, bu çalışmada kaplanmak istenen malzemenin yapısı da dikkate alınarak sol-jel metodu yardımıyla üretilen katkısız ve % 0,1, % 0,5, % 1, % 2 ve % 5 atomik oranlarında Al, Cu ve Sn katkılı ZnO numuneler üzerine kontak hazırlanması için uygun kaplama tekniği olarak şekil 2.154' de gösterilen Vaksis PVD Handy termal buharlaştırma sistemi tercih edilmiştir. Numune yüzeyinde kaplı olan ince film üzerindeki elektrotlar % 99,99 saflıktaki Alüminyum (Al) ile bir tungsten pota kullanılarak termal buharlaştırma metodu ile kaplanmıştır. Buharlaştırılacak Al metalinin miktarı ve kontak kalınlığı, bir kuartz kristal monitör ile görüntülenmiştir. Al elektrotların kaplama basıncı 5×10^{-5} Torr, kaplama hızı 9-15 Å/s'dir. 200 nm ile 250 nm arasında değişen kalınlıklardaki elektrotlar şekil 2.153'de görüldüğü gibi maske kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontak olan yüzeylerin ortamdaki gaz oranının değişimlerine karşı akım değişimleri takip edilerek numunelerin gaz sensörü olarak kullanımı test edilmiştir [56].



Şekil 2.153. Hazırlanan gaz sensörlerinin resmi



Şekil 2.154. Vaksis PVD Handy Termal Buharlaştırma Sistemi

Kaplama işlemi olarak vakumda termal buharlaştırma ile ince filmlerin temiz bir ortamda kaplanması gerçekleştirilmektedir. Termal buharlaştırma ile kaplama teknolojisi 1800'lü yıllardan beri bilinmekte, ancak son 50 senedir kendisine endüstride bir yer bulabilmiş, ince film kaplama tekniğidir. Günümüze kadar geliştirilen farklı kaplama işlemleri ile uygulanan bu tekniğin mekanizması basitçe şöyledir. Vakumlu ortamda, bir ısıtıcı (rezistans, lazer, elektron bombardımanı vb.) ile buharlaştırılan kaplayıcı malzeme, kaplanacak olan malzeme üzerinde ince bir film katmanı halinde biriktirilir [66]. Malzeme, vakum içinde uygulanan akımın etkisiyle potansiyelin ısıtılması ile kaplanır. Isıtılan malzemenin buharlaştırma basıncı, vakum odasındaki malzemenin zemin basıncından fazla olduğu zaman, malzeme soğutucu yüzeyler üzerine buharlaştırılır ve yoğunlaştırılır. Metal ve yarıiletken malzemelerin termal buharlaşması,

yüksek ve ultra yüksek vakum şartları altında gerçekleştirilir. Bu, üç temel sebep için yapılır. Birincisi, vakum odası boşaltılarak, oksijenin veya diğer gazların kısmi basıncı azaltılır, böylece malzemenin temiz bir şekilde kaplanması sağlanır ve cihazların kızışması önlenmiş olur. İkincisi, çoğu katıların buharlaştırma basıncı düşük olduğu için vakumda buharlaştırmayla, bu düşük buharlaşma basınçlı malzemelerin buharlaştırılması sağlanır. Üçüncüsü ise, buharlaştırılan malzemenin ortalama serbest yolu, kaynak-altlık boyutundan daha büyük olması için arttırılır ve böylece sapma olmaksızın altlığa kaplama yapılmasını sağlar.

Buharlaştırma yönteminde film kalınlığı, buharlaşma basıncına, buharlaşma hızına, uygulanan akım ve buharlaşacak malzemenin bulunduğu pota ile taşıyıcı arasındaki uzaklığa bağlıdır [68].

Sensör çalışmalarında ince film hazırlama yöntemlerinin hiç şüphesiz önemli bir parametresi de ölçüm sistemidir. Elde edilen sonuçların güvenilirliği ölçüm sisteminin hassasiyeti ve çevre faktörlerinden en az etkilenirliği ile yakından ilişkilidir. Özellikle çok geniş bir aralıkta ölçüm yapılmak istenildiği zaman hiç şüphesiz belli konsantrasyonda gazları elde etmek bile problem oluşturmaktadır.

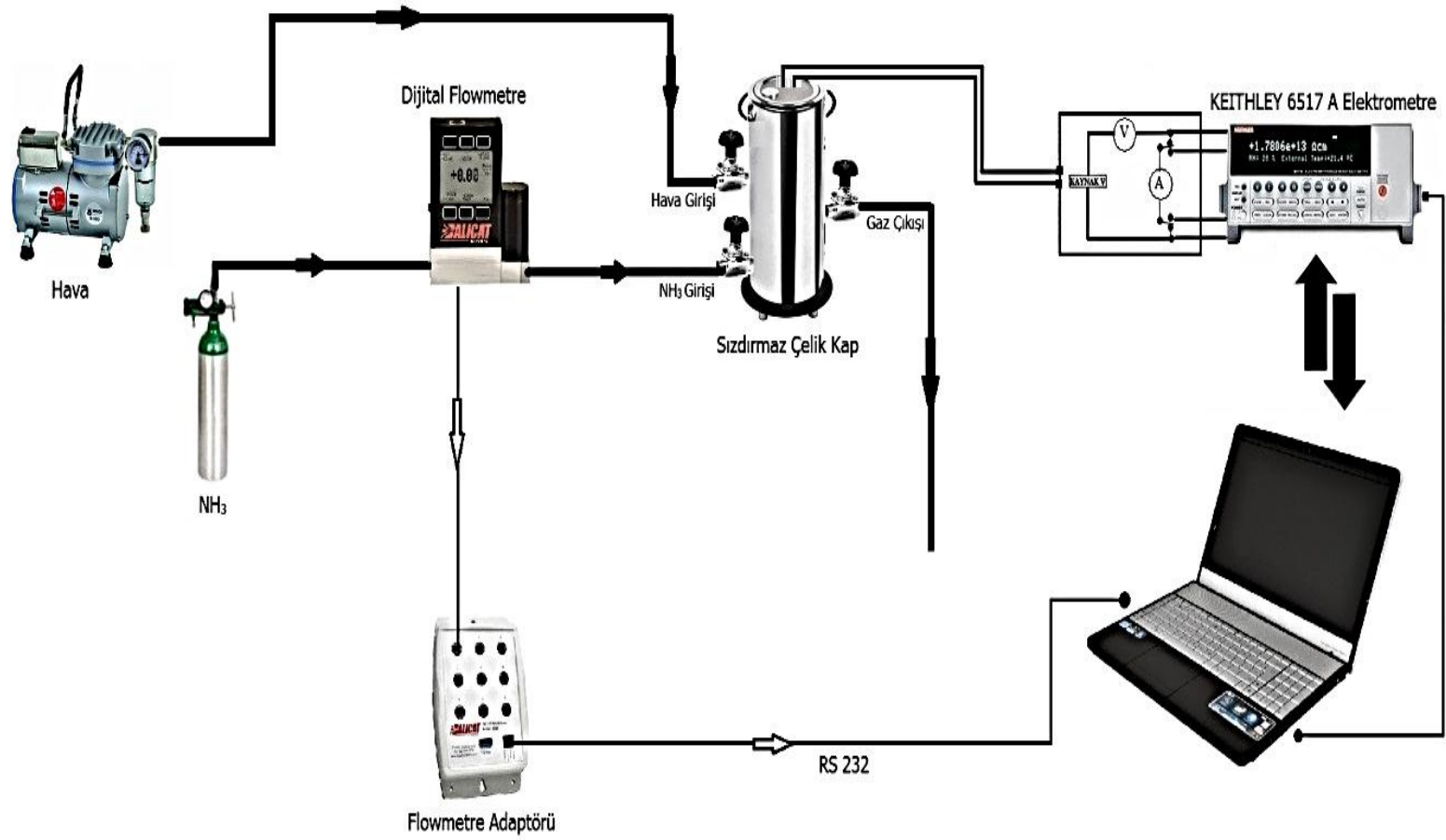
Gaz tepkisi bir gaza maruz kalan numunenin akım değişiminin oranı olarak tanımlanır.

$$S = \frac{I_g - I_h}{I_h} \quad (2.20)$$

Burada I_h bir numunenin hava ortamında ölçülen akımı, I_g ise gaz ortamında ölçülen akımıdır. Tepki zamanı bir sensörde akımın maksimum değişimini elde etmek için ihtiyaç duyulan zaman olarak tanımlanır. Geri dönüşüm zamanı ise ilk akım değerine % 80 oranında geri dönme zamanıdır. Duyarlılık, bir gaza karşılık veren bir sensörün yeteneği olarak bilinir [69,70].

Hazırlanan numunelerin gaz ölçümleri tasarlanmış olan bir sistemde amonyak (NH_3) gazı kullanılarak alınmıştır. Numunelerin farklı ppm'deki amonyak gazına karşı göstermiş olduğu tepkiler ölçülerek grafik ortamına aktarılmıştır. Tüm numunelerin gazla etkileşiminin olduğu her değişen gaz miktarında artan ya da azalan bir değişim gösterdiği görülmüştür. Bu ise numunelerin gaza karşı duyarlı olduğunu göstermektedir.

Katkılı ve katkısız ZnO numunelere farklı oranlarda 6600 ppm, 10000 ppm ve 13300 ppm amonyak gazı verilmiştir. Ölçüm esnasında sisteme 20s gaz verilip ardından 20s hava verilip sonrasında 20s beklenilmiştir. Her bir numune için ölçüm süresi toplam 200s sürmüştür. Şekil 2.155’de gaz sensör deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 2.155. Gaz sensör deney düzeneği

Katkısız ve Al, Cu, Sn katkılı ZnO ince filmleri hazırlanan gaz ölçüm düzeneğine yerleştirilip, numunelerin bulunduğu hazne içerisine belirlenen miktarlardaki NH₃ gazı verilmiştir. Ortama verilen gazın numunelerle etkileşimi akım-zaman grafiğine aktararak gözlemlenmiştir. Her bir numune için hesaplanan duyarlılık değerleri ile AFM’de hesaplanan ortalama tane büyüklükleri ve yüzey pürüzlülükleri ile uyum içerisinde. Numunelerin tane boyutu küçüldükçe taneler arasındaki boşluk ve gözenekli yapı azalacağından dolayı yapıya giren gaz miktarı azalmaktadır. Bu sebepten dolayı duyarlılık her numune için değişmektedir. Tüm numuneler için ölçüm süresince gaz verme işleminin hemen ardından ortama hava verilmesi sonucu numunedeki değişimin eski haline döndüğü gözlemlenmiştir. Zaten iyi bir sensörden beklenen sonuçta budur. Bu sonuçlara göre hazırlanan tüm ince filmler yoğun NH₃ gazına karşı duyarlıdır.

Katkısız ve Al katkılı ZnO ince filmlerinin akım-zaman grafikleri şekil 2.156’da görülmektedir. Katkısız ZnO numunesinin sensör özelliğinin araştırılması için verilen farklı konsantrasyonlardaki gaz miktarları içerisinde 10000 ppm değeri için yüksek bir akım değerine ulaştığı görülmektedir. Artan gaz miktarıyla beraber bu maksimum değer üzerindeki bir değere çıkmadığı gözlemlenmiştir. Filmin, yapısına ve taneler arasındaki boşluklara gazın alması için maksimum sınır değer bu kabul edilebilir. Bu miktardan fazlasına maruz kalan numunenin artık yapısı bozulmaya başlayacaktır. Al katkılı ZnO numune serisinde bu numunenin duyarlılık değeri % 5at. Al katkılı ZnO numunesinden küçük, diğer numunelere göre yüksek çıkmıştır. Bu değer diğerlerine göre yüksek çıkması demek bu numunenin serideki diğer numunelere göre gaz duyarlılığının fazla olması ve sensör özelliğine daha iyi cevap vermesi demektir.

% 0,1at. Al katkılı ZnO numunesinde en iyi tepkiyi 13300 ppm’de verdiği gözlenmiştir. Ortama verilen gaz oranları arttıkça akımında aynı paralellikte arttığı görülmektedir. % 0,1at. Al katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri oldukça küçük çıkmıştır. Bu numunenin yapısal analizindeki AFM de hesaplanan ortalama tane büyüklüğü değerinin küçük çıkması ile açıklanabilir.

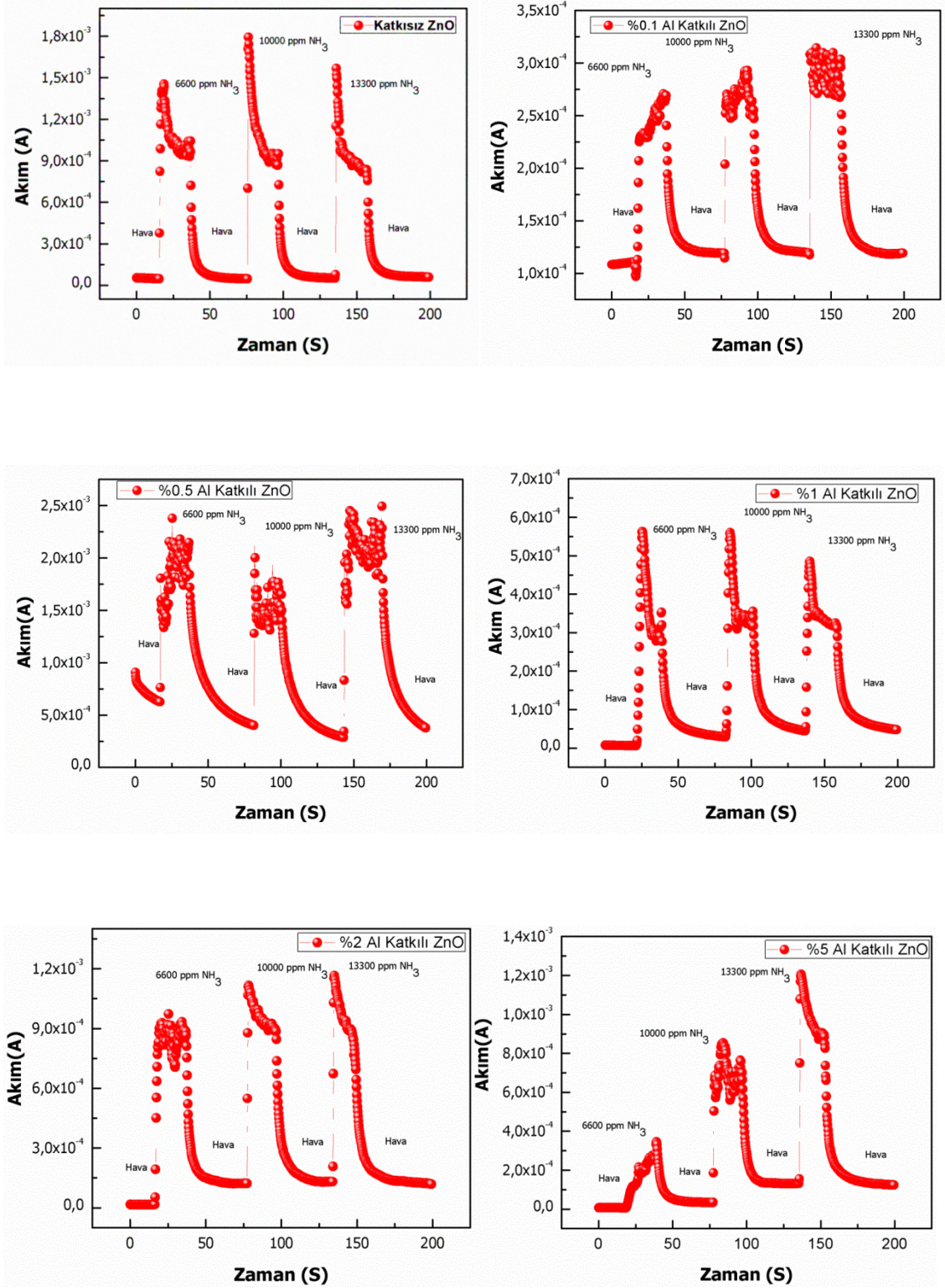
% 0,5at. Al katkılı ZnO numunesinin sensör özelliği incelenirken deney düzeneğindeki hazne içerisine gönderilen gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm’de verdiği gözlenmiştir. % 0,5at. Al katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri % 0,1at. Al katkılı numuneye göre büyük katkısız ZnO numuneye göre küçük çıkmıştır.

% 1at. Al katkılı ZnO numunesi için verilen amonyak gazları içerisinde 6600 ppm'de akımın en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Artan gaz oranıyla birlikte numunenin duyarlılık değerinin giderek azalmasının sebebi yapıya giren NH₃ gazının taneler arası boşluklardan tamamen uzaklaşmamasıdır. Yani desorbe olayının % 100 olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. % 1at. Al katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri % 0,5at. Al katkılı numuneye göre büyük katkısız ZnO numuneye göre küçük çıkmıştır.

% 2at. Al katkılı ZnO numunesinin uygulanan gaz miktarlarına karşı en iyi hassasiyeti 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. Artan gaz oranıyla birlikte numunenin akım değerinin giderek arttığı söylenebilir. % 2at. Al katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri % 1at. Al katkılı numuneye göre büyük katkısız ZnO numuneye göre küçük çıkmıştır.

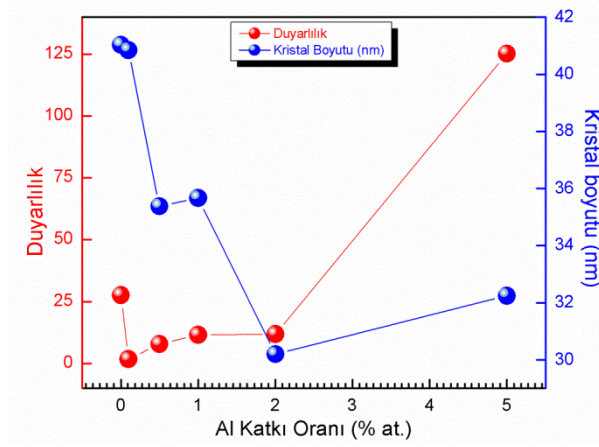
% 5at. Al katkılı ZnO numunesi için verilen gaz miktarları içerisindeki en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 5at. Al katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri hem % 2at. Al katkılı numuneye göre hem de katkısız ZnO numuneye göre oldukça büyük çıkmıştır.

Al katkılı ZnO numuneler içerisinde gaz duyarlılığı bakımından en iyi sonucu % 5at. Al katkılı ZnO numunesinin verdiği söylenebilir. Şekil 2.158' de görüldüğü gibi % 5 at. Al katkılı ZnO numunesinin yüzey pürüzlülüğünde en yüksek değerde çıkmıştır. Yani gazın numune yüzeyi üzerine tutunma olasılığı pürüzlülüğünden dolayı artarak iyi bir adsorbsiyon olayı gözlemlenmiştir.



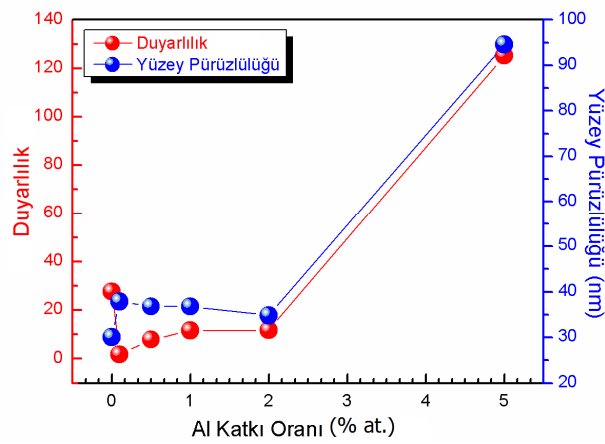
Şekil 2.156. Katkısız ve Al katkılı ZnO numunesinin akım-zaman grafiği

Hazırlanan Al katkılı ZnO numunelerin artan katkı oranına göre duyarlılık ve kristal boyutundaki değişimler şekil 2.157’ de verilmiştir.



Şekil 2.157. Al katkısı ile duyarlılık ve kristal boyutunun değişimi

Elde edilen Al katkılı ZnO numunelerin duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki şekil 2.158’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ile duyarlılığın doğru orantılı olduğu, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri % 5 at. Al katkılı numunede olduğundan dolayı en yüksek duyarlılığıda bu katkı oranına sahip numune göstermiştir.



Şekil 2.158. Al katkısı ile duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Hazırlanan katkısız ve Cu katkılı ZnO ince filmlerinin akım-zaman grafikleri şekil 2.159'da görülmektedir. Katkısız ZnO numunesinin verilen amonyak gazları içerisinde 13300 ppm'de akımın en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Cu katkılı ZnO numune serisinde bu numunenin duyarlılık değeri % 2at. Cu katkılı ZnO numunesinden küçük, diğer numunelere göre yüksek çıkmıştır.

% 0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin sensör özelliği araştırılırken ortama verilen farklı oranlardaki gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 0,1at. Cu katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri katkısız ZnO numuneye göre küçük çıkmıştır.

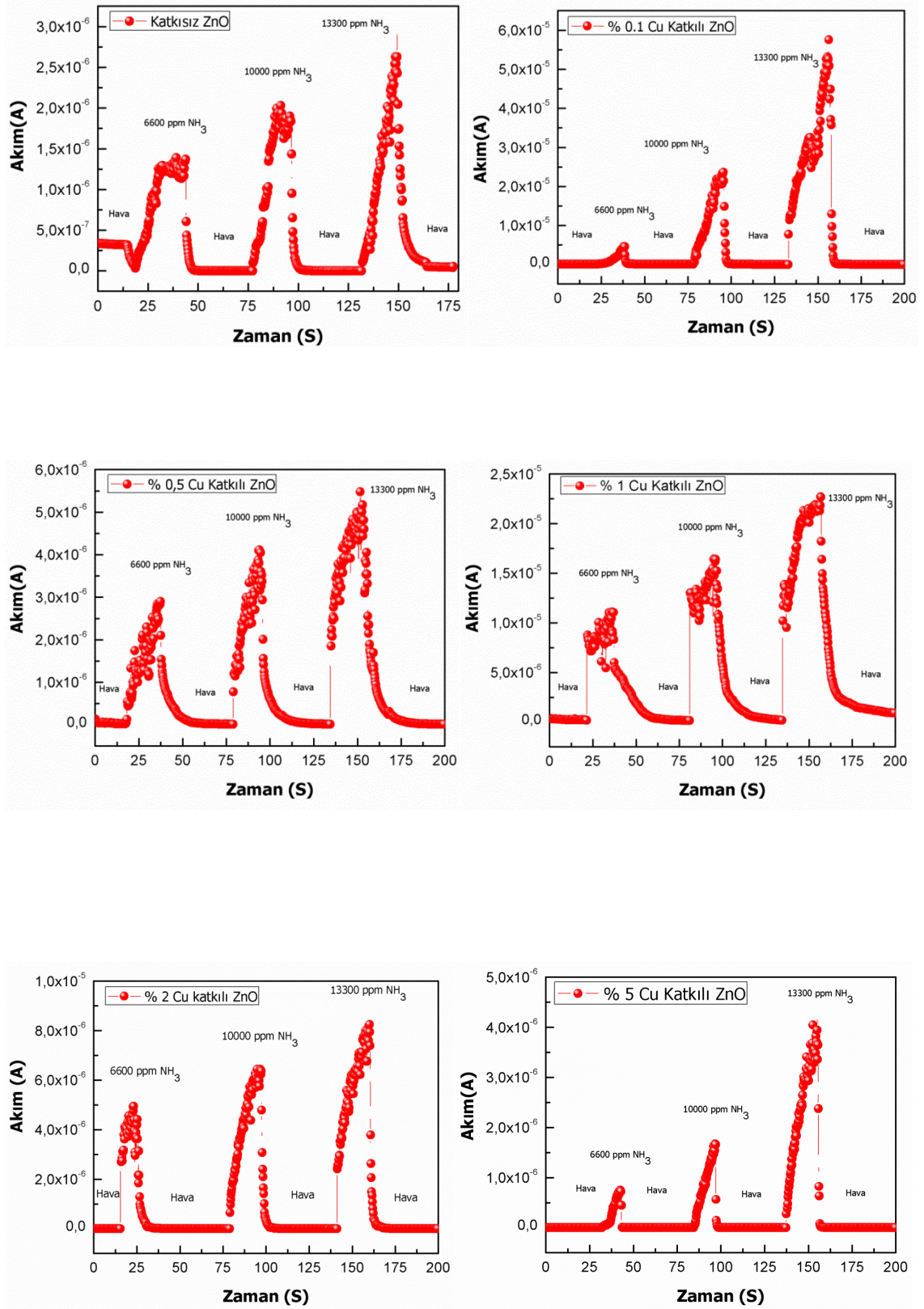
% 0,1at. Cu katkılı ZnO numunesinin duyarlılık özelliği incelenirken deney düzeneğindeki hazne içerisine gönderilen gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 0,5at. Cu katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri hem katkısız ZnO numuneye göre hem de % 0,1at. Cu katkılı ZnO numunesine göre küçük çıkmıştır.

% 1at. Cu katkılı ZnO numunesinin uygulanan gaz miktarlarına karşı en iyi hassasiyeti 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. Artan gaz oranıyla birlikte numunenin akım değerinin giderek arttığı söylenebilir. % 1at. Cu katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri hem % 0,5at. Cu katkılı numuneye göre hem de katkısız ZnO numuneye göre küçük çıkmıştır.

% 2at. Cu katkılı ZnO numunesi için verilen gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 2at. Cu katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri hem % 1at. Cu katkılı numuneye göre hem de katkısız ZnO numuneye göre büyük çıkmıştır.

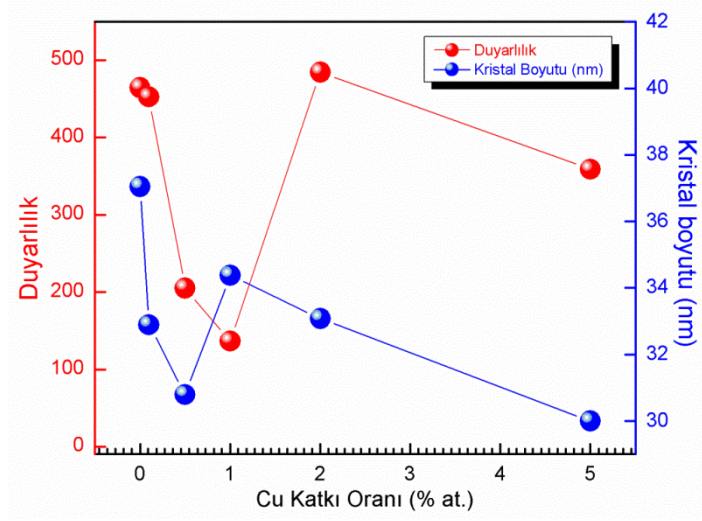
% 5at. Cu katkılı ZnO numunesinin sensör özelliği incelenirken farklı oranlardaki gaz konsantrasyonları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 5at. Cu katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri hem % 2at. Cu katkılı numuneye göre hem de katkısız ZnO numuneye göre küçük çıkmıştır.

Cu katkılı ZnO numuneleri hazırlanan diğer numunelere göre amonyak gazına karşı duyarlılığı daha iyi bir sonuç verdiği söylenebilir. Hesaplanan duyarlılık değerlerindeki yüksek çıkması bunun kanıtı şeklindedir. Şekil 2.160'da görüldüğü gibi artan katkıyla beraber kristal boyut ve duyarlılık değişmektedir. Ayrıca bu numunelerin yüzeylerinin pürüzlü olmasıyla adsorbsiyon olayının daha iyi olduğu görülmektedir.



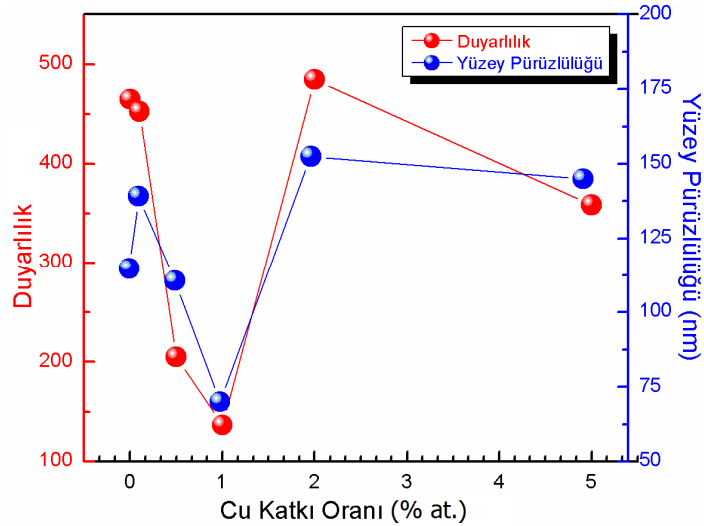
Şekil 2.159. Katkısız ve Cu katkılı ZnO numunesinin akım-zaman grafiği

Cu katkılı ZnO numunelerin katkı oranlarının artmasıyla duyarlılık ve kristal boyutundaki değişimler şekil 2.160'da verilmektedir.



Şekil 2.160. Cu katkısı ile duyarlılık ve kristal boyutunun değişimi

Elde edilen Cu katkılı ZnO numunelerin duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki şekil 2.161'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ile duyarlılığın doğru orantılı olduğu, en yüksek yüzey pürüzlülüğü ve duyarlılık değerinin %2 at. Cu katkılı numunede olduğu görülmektedir.



Şekil 2.161. Cu katkısı ile duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Katkısız ve Sn katkılı ZnO ince filmlerinin akım-zaman grafikleri şekil 2.162'de görülmektedir. Katkısız ZnO numunesinin sensör özelliği araştırılırken ortama verilen farklı oranlardaki gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 6600 ppm'de verdiği gözlenmiştir. Artan gaz oranıyla birlikte numunenin duyarlılık değerinin giderek azalmasının sebebi yapıya giren NH₃ gazının taneler arası boşluklardan tamamen uzaklaşmamasıdır. Katkısız ZnO numunenin duyarlılık değeri Sn katkılı ZnO serisi içerisinde en küçük çıkmıştır

% 0,1at. Sn katkılı ZnO numunesinin sensör özelliği araştırılırken hazne içerisine gönderilen farklı oranlardaki gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 0,1at. Sn katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri katkısız ZnO numuneye göre büyük çıkmıştır. Bu numunenin yapısal analizindeki AFM de hesaplanan ortalama tane büyüklüğü değeri ile paralellik göstermektedir.

% 0,5at. Sn katkılı ZnO numunesinin hassasiyeti incelenirken uygulanan NH₃ gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 0,5at. Sn katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri katkısız ZnO numuneye göre büyük, % 0,1at. Sn katkılı ZnO numunesine göre küçük çıkmıştır.

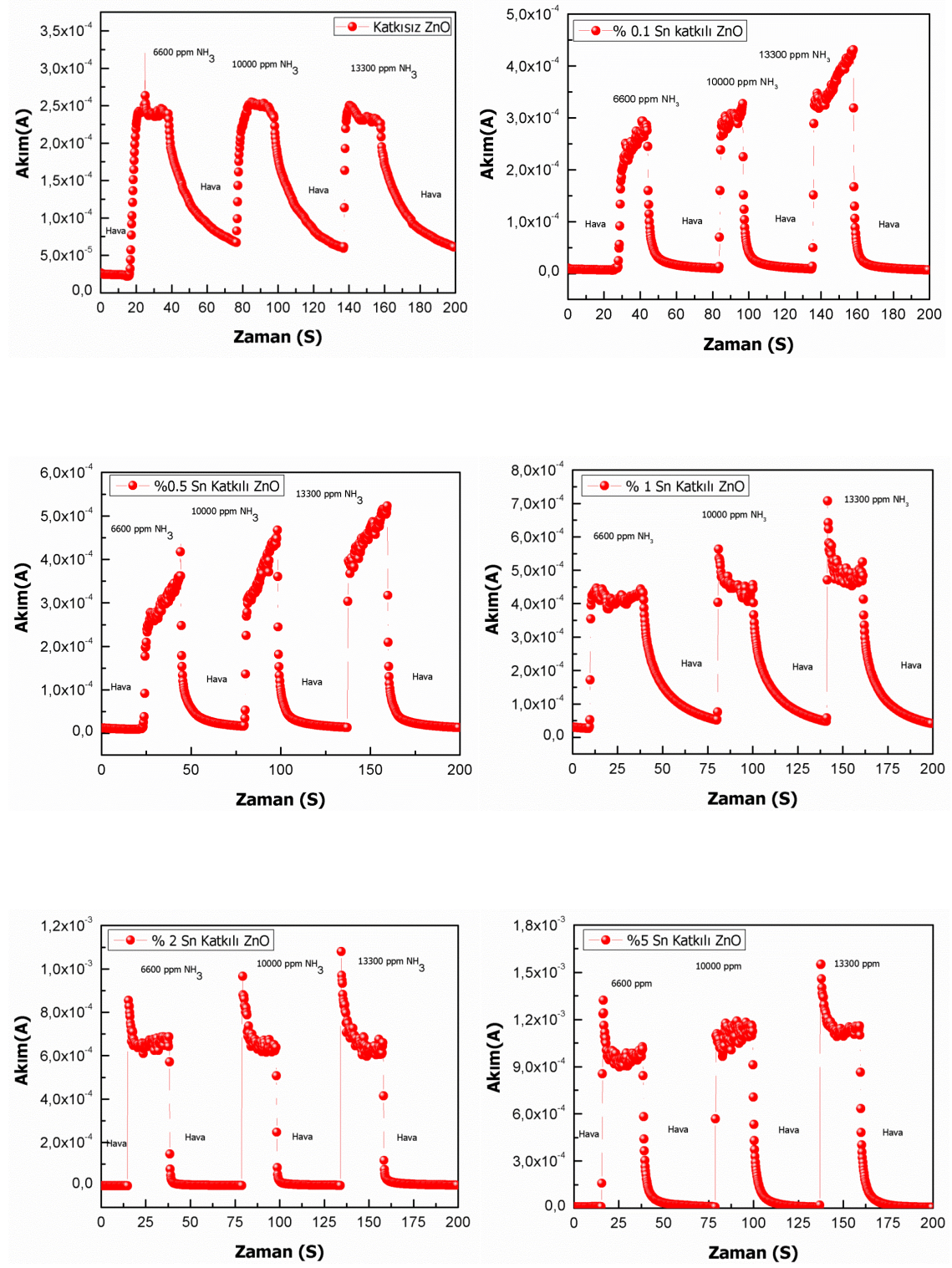
% 1at. Sn katkılı ZnO numunesinin sensör özelliği araştırılırken ortama verilen farklı oranlardaki gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 1at. Sn katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri katkısız ZnO numuneye göre büyük, % 0,5at. Sn katkılı ZnO numunesine göre küçük çıkmıştır.

% 2at. Sn katkılı ZnO numunesinin duyarlılık özelliği incelenirken deney düzeneğindeki hazne içerisine gönderilen gaz miktarları içerisinde en iyi tepkiyi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 2at. Sn katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri hem katkısız ZnO numuneye göre büyük hem de % 1at. Sn katkılı ZnO numunesine göre büyük çıkmıştır.

% 5at. Sn katkılı ZnO numunesinin en iyi tepkisi 13300 ppm'de verdiği gözlenmiştir. % 5at. Sn katkılı ZnO numunenin duyarlılık değeri katkısız ZnO numuneye göre büyük, % 2at. Sn katkılı ZnO numunesine göre küçük çıkmıştır.

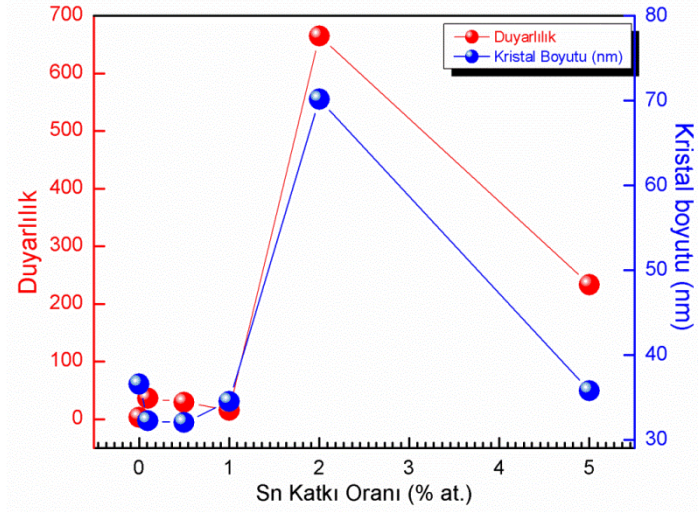
Sn katkılı ZnO serisi için çizilen artan katkıya karşı duyarlılık ve kristal boyutu grafiği ile yüzey pürüzlülüğü grafikleri birbirleriyle örtüşmektedir (şekil 2.163 ve şekil 2.164). En yüksek kristal boyut ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü % 2 at. Sn katkılı için

görülmektedir. Bu ise % 2 at. Sn katkılı numune için duyarlılığın en büyük değerde olduğunu doğrulamaktadır.



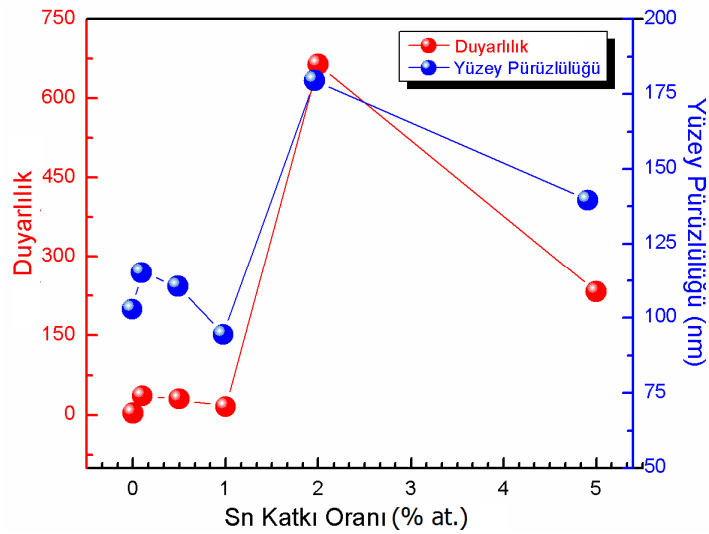
Şekil 2.162. Katkısız ZnO numunesinin akım - zaman grafiği

Sn katkılı ZnO numunelerin katkı oranlarının artmasıyla duyarlılık ve kristal boyutundaki değişimler şekil 2.163’de verilmektedir.



Şekil 2.163. Sn katkısı ile duyarlılık ve kristal boyutunun değişimi

Elde edilen Sn katkılı ZnO numunelerin duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki şekil 2.164’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ile duyarlılığın doğru orantılı olduğu, en yüksek yüzey pürüzlülüğü ve duyarlılık değerinin % 2at. Sn katkılı numunede olduğu görülmektedir.



Şekil 2.164. Sn katkısı ile duyarlılık ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada sol-jel yöntemi ile üretilen Al, Cu ve Sn katkılı yarıiletken malzemelerin yapısal, optiksel, elektriksel ve gaz duyarlılık özellikleri incelenmiştir.

Hazırlanan ZnO ince filmlerin kristal yapıları incelendiğinde filmlerin polikristal yapıda oldukları ve yapıya Al, Cu ve Sn katkılarının girmesiyle kristalleşmelerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Hazırlanan filmlerin, hegzagonal yapıdaki ZnO'ye ait referans değerleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür [22,23]. Ayrıca katkı miktarlarıyla kristal büyüklüklerinin değiştiği de tespit edilmiştir.

Katkısız ve Al, Cu ve Sn katkılı ZnO numunelerinin X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde farklı yönelime sahip düzlemlerin oluşturduğu pikler görülmüş ve bu numuneler için (100), (002) ve (101) olmak üzere üç farklı karakteristik pike karşılık gelen düzlemlerin literatürle örtüştüğü saptanmıştır [56,70-74].

Katkısız ve Al, Cu ve Sn katkılı ZnO filmlerin X-ışını kırınım spektrumu ölçümlerine göre numunelerin kristal boyutları Scherrer bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır [15,57]. Numunelerin XRD sonuçları malzemelerin nano yapıya sahip olduğu göstermektedir.

Hazırlanan filmler taramalı elektron mikroskobu altında tane yapısının gözlenmesi amacıyla yüksek büyütmelerde, filmin genel morfolojisini gözlemek için de düşük büyütmelerde incelenmiştir.

Al, Cu ve Sn katkılı ZnO için filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde katkısız ZnO için tane büyüklükleri ve fiberlerin daha belirgin olduğu, katkı ilavesiyle fiberlerin neredeyse kaybolduğu ancak artan katkıyla da fiberlerin yeniden belirginleşmeye başladığı görülmektedir. Zaten alınan ortalama tane büyüklüğü de bunun kanıtıdır. Filmlerin yüzey pürüzlülüğünde filmlerin pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu, boşluk ve çatlaklara rastlanıldığı görülmüştür. Tüm numunelerin yüzey yapısı farklı boyut ve morfolojilere sahip tanelerden oluşmaktadır.

AFM görüntülerinden mikrofiberler ve düzenli taneler açık şekilde görülmektedir. Genel olarak elde edilen numunelerin yüzeylerinin gözenekli ve pürüzlü bir yapıya sahip olduğu ve ZnO'ya yapılan Al, Cu ve Sn katkılarının tane büyüklüğünü değiştirdiği gözlemlenmiştir. Böyle bir yüzey yapısının gaz sensörünün algılama

performansını geliştireceği bilinmektedir. Ayrıca tane boyutunun gaz algılama performansına iki türlü etki edeceği düşünülmektedir. İlk olarak küçük boyutlu tanelerden oluşan yapının elde edilmiş olması aktif yüzey alanını arttıracığından sensörün performansını geliştirecektir. İkinci olarak tane büyüklüğünün artması yapıyı daha gözenekli oluşturacağından, taneler arası boşluk artacağından yapıya giren gaz miktarı artacaktır. Böylece gaz algılama yeteneği artmış olacaktır. Bu çalışmamızdaki elde edilen sonuçlar göstermiştir ki tane boyutu arttıkça üretilen numunelerin gaz algılama yeteneği de artmıştır. Numunelerin gaza duyarlılığı yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilecek olursa pürüzlülük değerinin artması ile yüzeye tutunan gaz miktarı artacaktır. Böylece numunenin gaz algılama yeteneği artmış olacaktır.

Numunelerin optiksel özellikleri ise, yansıma (R), numune yüzeyinden yansıyan ışının şiddetinin numune üzerine gelen ışının şiddetine oranıdır. Çizilen % yansıma-dalga boyu spektrumlarında genel olarak yansıma ortalama 400 nm dalga boylarında bir pik göstermiştir. Sol-jel yöntemiyle elde edilen yarıiletken numunelerin oda sıcaklığında temel absorpsiyon spektrumları 300-800 nm tarama bölgesinde elde edilmiştir. Al, Cu ve Sn katkılı ZnO yarıiletken numunelerin yasak enerji aralıklarının belirlenmesinde optik absorpsiyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde elde edilen yarıiletken numunelerin $h\nu - (\alpha h\nu)^n$ grafikleri çizilmiştir. Grafiğin lineer olduğu kısma karşı gelen doğrunun $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^n = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri o materyalin yasak enerji aralığı değerini verir. n değeri 2 ise materyal dolaylı band aralığına sahiptir, n değeri 1/2 ise materyal doğrudan band aralığına sahiptir. Elde edilen grafiklerde n yerine 1/2 konulduğunda en iyi lineerlik belirlenmiştir. Böylece yarıiletken numunelerin doğrudan band geçişine sahip oldukları belirlenmiştir. Hesaplanan yasak enerji aralıklarının da 3,024 eV ile 3,297 eV aralığında bulunmuştur. ZnO içine yapılan tüm katkılama materyallerinin yasak enerji aralığını değiştirdiğini gözlemlenmiştir.

Hazırlanan amonyak gaz sensörlerinin elektrik karakterizasyonu farklı miktarlardaki yoğun NH_3 gazı için yapılmıştır.

Sensör algılayıcı yüzeyi gaza maruz bırakıldığında nanoyapılı ZnO malzemesinin yüzeyi ile gaz molekülleri arasında meydana gelen fiziksel bir etkileşim sonucu sensör yüzeyi üzerine gaz molekülleri adsorbe edilir. Grafiklerden, bu adsorpsiyon sürecinde akımın birden arttığı ve daha sonra parabolik bir azalma gösterdiği görülmektedir. Daha sonraki süreçte sensör gazlı ortamdan dış ortama

alındığında tersi bir süreç başlamıştır. Gaz moleküllerinin yüzey üzerinden ayrılmasıyla (desorpsiyon) akım değişimi zamanla azalıp tekrar başlangıç seviyesine geri dönmüştür. Numunelerin tamamının adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerinde gaz değişimlerine karşı cevapları oldukça hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Numunelerin yüzeyinden gazı kısa sürede adsorbe ve desorbe ettikleri görülmüştür. Her ne kadar adsorbe edilen gaz moleküllerinin desorpsiyon safhasında % 100 desorbe edildiği söylenemese de, numunelerin adsorbe ve desorbe edebilme yetenekleri oldukça iyidir. Yani sensörün tekrar eden ölçümlerde kararlılığın iyi olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin nano yapıda seçilmesinin nedeni artan yüzey hacim oranı ile daha iyi algılama yeteneğinin elde edilmesi içindir.

Üretilen sensörlerin algılama özellikleri ZnO'ye Al, Cu ve Sn katkılarlarına bağlı olarak incelenmiştir. Sensör algılama özellikleri kullanılan katkı metaline bağlı olarak değişmektedir. Sonuç olarak, yapılan çalışmadan elde edilen ölçüm sonuçları incelendiğinde hazırlanan ZnO filmlerinin kısa cevap süresi, iyi bir geri dönüşüm, kararlı yapı, iyi bir seviyede duyarlılık ayrıca ucuz ve kolay kaplanabilir özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Yani katkısız, Al, Cu ve Sn katkılı ZnO ince filmleri ideal bir sensörün sahip olması gereken özellikleri taşıdıklarından dolayı, yüksek miktardaki amonyak gazlarının tesbitinde kullanılabilirliğini gösterir.

4. ÖNERİLER

- Sol-jel yöntemi ile jel hazırlama aşamalarında süre, sıcaklık, film kalınlığı, kaplamadaki döndürme hızı ve ısıl işlem sıcaklığı gibi birçok parametre değiştirilerek farklı özellikteki numuneler elde edilerek yapısal, optik, elektrik ve gaz duyarlılık ölçümleri alınıp kıyaslama yapılabilir.
- Hazırlanan numuneler için katkı oranları değiştirilip farklı katkı oranlarının amonyak gazına vereceği tepkiler ölçülüp kıyaslanabilir.
- Altlık olarak mikroskop camı dışında farklı altlıklar kullanılarak filmin altlık üzerinde büyüme şeklinin ve yapısının göstereceği değişiklikler araştırılabilir.
- Filmler üzerine aralıklı elektroda sahip sensörler yardımıyla termal buharlaştırma sonucu oluşturulan elektrotların cinsi, şekli ve boyutları değiştirilerek alınan sonuçlar kıyaslanabilir.
- Gaz duyarlılık ölçümleri için daha düşük ya da daha yüksek miktarlarda amonyak gazları kullanılabilir.
- İnce film oluşturmanın yanısıra toz şeklindeki numuneler şekillendirilerek gaz hassasiyetleri araştırılabilir.
- Hazırlanan numunelerin farklı gazlara duyarlı olup olmadığı test edilebilir.
- Gaz duyarlılığının tespitinde ölçüm süresi ve sayısı artırılarak tekrarlanabilirlik özelliği detaylıca araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dulda, A.**, 2006. II-VI Grubu Nanoyapıların Sentezlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Günkaya, G.**, 2008. Nanokristalin SnO₂ Sentezlenmesi ve Elektroforez Kaplama Yöntemiyle Sensör Üretimi, *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [3] **Dinek, T.**, 2006. CdO Yarıiletken Bileşiğinin Spray Pyrolysis Yöntemi İle Elde Edilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [4] **Gümüş, H.**, 2005. Al_{0.2} Ga_{0.8} As/GaAs (100) Nanoyapısının Büyütülmesi ve I-V Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] **Bayansal, F.**, 2009. Katkılı- Katkısız Bakır Oksit İnce Filmlerinin Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gaziosmanpaşa Üniveristesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- [6] **Ates, T., Tatar, C., Yakuphanoglu, F.**, 2013. Preparation of semiconductor ZnO powders by sol-gel method: Humidity sensors, *Sensors and Actuators A*, 190, 153– 160.
- [7] **Gürbüz, M.**, 2007. Elektrosprey Yöntemiyle Nano Boyutlu Yarı İletken Metal Oksitlerin Sensör Amaçlı Kaplanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [8] **Eren, O.**, 2006. Alüminyum Katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [9] **Şener, D.**, 2006. Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Metal Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Properties, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **5**, 1561-1573(13).
Zinc Oxide Thick Film Resistors as NH₃ Gas Sensor, *Sensors and Actuators B*, **115**, 128–133.

- [10] **Aksoy, S.**, 2006. Kalay katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [11] **Özkendir, Ö.M.**, 2006. MnS, ZnO ve SnO₂ İnce Filmlerin Elektronik Yapısının X-Işını Soğurma Spektroskopisi İle İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [12] **Karakız, M.**, 2008. Farklı Çözeltiler Kullanılarak Üretilen ZnO İnce Filmlerinin Yapısal Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [13] **İlican, S., Caglar, Y., Caglar, M., Yakuphanoglu, F.**, 2008. Structural, optical and electrical properties of F-doped ZnO nanorod semiconductor thin films deposited by sol–gel process, *Applied Surface Science*, **255**, 2353–2359.
- [14] **Aydın, C.**, 2010. Metal Oksit Katkılı Yarıiletken Malzemelerinin Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [15] **Benramache, S., Benhaoua, B., Chabane, F., Guettaf, A.**, 2012. A comparative study on the nanocrystalline ZnO thin films prepared by ultrasonic spray and sol–gel method, *Optik*, Article in press.
- [16] **Caglar, M., İlican, S., Caglar, Y., Yakuphanoglu, F.**, 2009. Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film, *Applied Surface Science*, **255**, 4491–4496.
- [17] **Demirci, B.**, 2006. İndiyum Katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- [18] **Özdemir, M.D.**, 2006. Atmalı Plazma Katodik Ark Yöntemi ile Elde Edilen ZnO İnce Filmlerin Optik ve Yapısal Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [19] **Bilgen, Y.**, 2008. Sol-Gel Yöntemiyle Üretilen Nanokristal ZnO:Ga İnce Filmlerinin Optik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze.
- [20] **Zhiyong Fan and Jia G. Lu**, 2005, Zinc Oxide Nanostructures : Synthesis and
- [21] **Sorar, İ., Tepehan, F.Z.**, 2009. ZnO İnce Filmlerinin Optik ve Yapısal Özelliklerine Isıl İşlem Sıcaklığının Etkisi, *İTÜ dergisi*, **1**,21-26.
- [22] **Cui, L., Wang, G., YuZhang, H., Sun, R., Kuang, P., Han, J.**, 2013. Effect of film thickness and annealing temperature on the structural and optical properties of ZnO thin films deposited on sapphire (0001) substrates by sol-gel, *Ceramics International*, **39**, 3261–3268.
- [23] **Vishwas, M., Rao, K.R., Arjuna Gowd, K.V., Chakradhar, R.P.S.**, 2010. Effect of sintering on optical, structural and photoluminescence properties of ZnO thin films prepared by sol-gel process, *Spectrochimica Acta Part A*, **77**, 330–333.
- [24] **Farag, A.A.M., Cavas, M., Yakuphanoglu, F., Amanullah, F.M.**, 2011. Photoluminescence and optical properties of nanostructure Ni doped ZnO thin films prepared by sol-gel spin coating technique, *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 7900–7908.
- [25] **Tüzemen, E.Ş.**, 2007. ZnO İnce Filmlerinin Eldesi ve Aygıt Üretimi İçin Parametrelerinin Optimizasyonu, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [26] http://learning.hccs.edu/faculty/steven.dessens/website_pictures/nacl-unit-cell Erişim Tarihi:01.02.2013.
- [27] http://www.glowyoyo.com/The_Science_of_Glow.htm, Erişim Tarihi:01.02.2013.
- [28] <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1529503> , Erişim Tarihi:01.02.2013.

- [29] Sorar, İ., 2008. Katkılı ve Katkısız Çinko Oksit (ZnO) İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, *Doktora Tezi*, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] Yen, C.-Y., Jian, S.-R., Chen, G.-J., Lin, C.-M., Lee, H.-Y., Ke, W.-C., Liao, Y.-Y., Yang, P.-F., Wang, C.-T., Lai, Y.-S., Jang, S.-C., Juang, J.-Y., 2011. Influence of annealing temperature on the structural, optical and mechanical properties of ALD-derived ZnO thin films, *Applied Surface Science*, **257**, 7900–7905.
- [31] Wang, Y., Wang, H., Li, S., Zhou, S., Hang, Y., Xu, J., Ye, J., Gu, S., Zhang, R., 2005. Annealing effect on properties of ZnO thin films grown on LiNbO₃ substrates by MOCVD, *Journal of Crystal Growth*, **284**, 319–323.
- [32] Caglar, M., Yakuphanoglu, F., 2012. Structural and optical properties of copper doped ZnO films derived by sol–gel, *Applied Surface Science*, **258**, 3039–3044.
- [33] Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., Yakuphanoglu, F., Wu, J., Gao, K., Lu, P., Xue, D., 2009. Influence of heat treatment on the nanocrystalline structure of ZnO film deposited on p-Si, *Journal of Alloys and Compounds*, **481**, 885–889.
- [34] Polat, E.G., 2009. Sol-Jel Yöntemi ile Bakır ve Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi, Optik ve Mikroyapısal Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [35] Toplan, N., 2013. Sol-Jel Metoduyla Amorf Malzeme Üretimi , *Ders-Ödev Notları* (<http://web.sakarya.edu.tr/>), Sakarya Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya.
- [36] Çavaş, M., 2011. Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Foto Diyotların Üretilmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [37] Pankove, J.I., 1971. Optical processes in semiconductors, Solid State Physical Electronics Series, Prentice-Hall, New Jersey.

- [38] **Ilhan, S., Çağlar, Y., Çağlar, M.**, 2005. CdZnS ve ZnO Yarıiletken Filmlerin Yasak Enerji Aralıkları, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9.Cilt, 1.
- [39] **Bostancı, H.**, 2006. Amorf InTe Yarıiletken Malzemesinin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [40] **Kittel, C.**, 1996, Katılmal Fiziğine Giriş, Çeviri: “Karaoğlu B.”, Güven Yayınları, İstanbul.
- [41] **Omar, M.A.**, 1975. Elementary Solid State Physics, Addison-Wesley Publishing Company Inc, Menlo Park, California.
- [42] **Yakuphanoglu, F.**, 2010. Electrical characterization and device characterization of ZnO microring shaped films by sol-gel method, *Journal of Alloys and Compounds*, **507**, 184–189.
- [43] **Mott, N.F. and Davis, E.A.**, 1971, Electronic Processes in Non-Crystalline Materials, Clarendon Press, Oxford, London.
- [44] **Cağlar, M., İhan, S., Çağlar, Y., Yakuphanoglu, F.**, 2009. Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film, *Applied Surface Science*, **255**, 4491–4496.
- [45] **Leydecker, S.**, 2010. Nano Materials: Applications of Nano Materials in Architecture and Design, pp. 16-17, Caroline Behlen, Berlin.
- [46] **Arıç, E.**, 2010. Nanoyapıda Çinko Oksit Partiküllerinden Üretimi Ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] **Karabey, T.**, 2011. ZnO Nanoyapıların Elektrokimyasal Depolama Yöntemiyle Büyütülmesi ve Optik Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [48] **Karadeniz, S.M.**, 2011. Nanoyapıda Tungsten Oksit İnce Filmlerinin Büyütülmesi ve Yapısal, Elektriksel, Optik Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- [49] **Doğan, G.**, 2008. Yeni Nesil Polimerik Nanoyapıların Hazırlanması ve Enzim İmmobilizasyonunda Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Adnan Menderes Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın.
- [50] **Açıkbaş, Y.**, 2006. 1,3-Bis-(4-İmino-3-Hidroksi-Benzoikasit) İndan Maddesinin Langmuir-Blodgett İnce Film özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [51] **Doğan, E.**, 2010. QCM Sensör Tabanlı Taşınabilir Gaz Ölçüm Cihazı Geliştirme, *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [52] **Şen, S.**, 2008. Seçilmiş Organik Malzemelerin İnce Film ve Organik Buhar Sensörü Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.
- [53] **Temurtaş, F.**, 2000. Kimyasal Sensör Dizilerinde Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık Uygulamaları: Gazların Sınıflandırılması ve Gaz Konsantrasyonlarının Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [54] **Mamishva, A.V., Takahashib, A.R., Duc, Y., Lesieutred, B.C., Zahnb, M.**, 2002. Parameter estimation in dielectrometry measurements, *Journal of Electrostatics*, **56**, 465–492.
- [55] **Varan, S.**, 2005. Düşük Sıcaklık Kompozit Amonyak Gaz Sensörler, *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [56] **Ateş, T.**, 2012. Metal Oksit Yarıiletken Malzemelerin Üretilmesi ve Kuartz Kristal Mikroterazi Nem Sensörlerinin Hazırlanması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [57] **Zhong, W.W, Liu, F.M., Cai, L.G., Zhou, C.C., Ding, P., Zhang, H.**, 2010. Annealing effects of co-doping with Al and Sb on structure and optical–electrical properties of the ZnO thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, **499**, 265–268.

- [58] **Askeland, D.R.**, 2002. Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, Çeviri: “Erdogan M.”, Nobel Yayınları, Ankara.
- [59] **Natsume, Y. and Sakata, H.**, 2002. Electrical and optical properties of zinc oxide films post-annealing in H₂ after fabrication by sol-gel process, *Materials Chemistry and Physics*, **78**,170-176.
- [60] **Al-Ani, S.K.J., Al-Ramadin, Y., Ahmad M.S., Zihlif, A.M., Volpe, M., Malineonico, M., Martuscelli, E. and Ragosta, G.**, 1999. The optical properties polymethylmethacrylate polymer dispersed liquid crystals, *Polimer Teasting*, **18**, 611-619.
- [61] **Gürbulak, B.**, 2001. The optical investigation of TIGa_{0,999}Pr_{0,001}Se₂ and TIGaSe₂ single crystals, *Physica B*, 293, 289-296.
- [62] **Weinstein, I.A., Zatsepin, A.F. and Kortov, V.**, 2001. Effect of structural disorder and Urbach’s rule in binary lead silicate glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **279**, 77-87.
- [63] **Benramdane, N., Murad, W.A., Misho, R.H., Ziane, M. and Kebbab, Z.**, 2003. A chemical method for the preparation of thin films of CdO and ZnO, *Materials Chemistry and Physics*, **48**, 119-123.
- [64] **El- Zahed, A., El-Korashy, A. and Rahem, M.A.**, 2003, Effect of heat treatment on some of the optical parameters of Cu₉Ge₁₁T₈₀ films, *Vacuum*, 68, 19-27.
- [65] **Wang, Y., Chu, B.**, 2008. Structural and optical properties of ZnO thin films on (111) CaF₂ substrates grown by magnetron sputtering, *Superlattices and Microstructures*, **44**, 54–61.
- [66] **Chougule, M.A., Sen, S., Patil, V.B.**, 2012. Fabrication of nanostructured ZnO thin film sensor for NO₂ monitoring, *Ceramics International*, **38**, 2685–2692.
- [67] **www.wikipedia.org/wiki/** Fiziksel buhar biriktirme. 7 Nisan 2011.
- [68] **Gündüz, B.**, 2011. Organik Alan Etkili Transistörlerin Üretilmesi ve Elektriksel Karakteristiklerinin Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [69] **Wagh, M.S., Jain, G.H., Patil, D.R., Patil, S.A. and Patil, L.A.**, 2006. Modified Zinc Oxide Thick Film Resistors as NH₃ Gas Sensor, *Sensors and Actuators B*, **115**, 128–133.

- [70] Wang, W., Li, Z., Liu, L., Zhang, H., Zheng, W., Wang, Y., Huang, H., Wang, Z., Wang, C., 2009. Humidity sensor based on LiCl-doped ZnO electrospun nanofibers, *Sensors and Actuators B*, **141**, 404-409.
- [71] Erol, A., Okur, S., Yağmurcukardeş, N., Arıkan M.C., 2011. Humidity-sensing properties of a ZnO nanowire film as measured with a QCM, *Sensors and Actuators B*, **152**, 115-120.
- [72] Zhou, X., Zhang, J., Jiang, T., Wang, X., Zhu, Z., 2007. Humidity detection by nanostructured ZnO: A wireless quartz crystal microbalance investigation, *Sensors and Actuators A*, **135**, 209-214.
- [73] Tsay, C.Y., Cheng, H.-C., Tung, Y.-T., Tuan, W.-H., Lin, C.-K., 2008. Effect of Mn doping on the optical and structural properties of ZnO nano/micro-fibrous thin film synthesized by sol-gel technique, *Physica B*, **387**, 103-108.
- [74] Fauteux, C., Smirani, R., Pegna, J., El Khakani, M.A., Therriault, D., 2009. Fast synthesis of ZnO nanostructures by laser-induced chemical liquid deposition, *Applied Surface Science*, **255**, 5359-5362.

ÖZGEÇMİŞ

Handan AYDIN, 13.04.1982 tarihinde Elazığ'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. Fırat Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans öğrenimini 'Amorf InTe Yarıiletken Malzemesinin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması' konulu bir tez sunarak 2006 yılında tamamladı. Evli ve bir çocuk annesidir.